



Д. Г. МАКСИМОВ

КУРС ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ



ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1958

Д. Г. МАКСИМОВ

КУРС ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

*ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ
(переработанное)*

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1958

Д. Г. Максимов. Курс электротехники

В книге изложены физические основы электротехники, теория постоянного и переменного токов, даны основные сведения о химических источниках электрической энергии, электрических машинах и электрических измерениях. Все теоретические положения и расчетные формулы сопровождаются большим количеством практических примеров с решениями.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящая книга, выходящая третьим изданием, существенно переработана по сравнению с ее вторым изданием.

Книга рассчитана на читателей, знакомых с математикой и физикой в объеме средней школы, и соответствует программам средних специальных школ, где электротехника является одной из основных общетехнических дисциплин.

При подготовке третьего издания книги автором были учтены отзывы и замечания рецензентов и обучающихся. Автор выражает глубокую благодарность всем лицам, критика которых способствовала выявлению недостатков предыдущего издания книги и, следовательно, улучшению настоящего ее издания.

Отзывы и пожелания просьба направлять по адресу: Москва, Тверской бульвар, 18, Военное издательство.

Автор


БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

(по ГОСТ 1494—49)







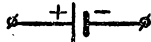


Наименование величины	Обозначения	
	главные	запасные
Емкость электрическая	C	
Заряд электрона	e	q
Индуктивность; коэффициент самоиндукций	L	
Индуктивность взаимная; коэффициент взаимной индукции	M	
Индукция магнитная	B	
Количество электричества; заряд электрический	Q, q	
Коэффициент связи	k	
Коэффициент электрического сопротивления температурный	α	
Мощность активная	P	P_a
Мощность кажущаяся	S	P_b, P_k
Мощность мгновенная	p	
Мощность реактивная	Q	P_r
Намагниченность	J	
Напряжение электрическое	U, u	e
Напряженность магнитного поля	H	
Напряженность электрического поля	E	
Плотность тока	δ	j
Поток магнитный	Φ	
Потокоцепление магнитное; магнитный поток полный	ψ	
Проводимость активная электрическая	g	
Проводимость полная электрическая	y	
Проводимость реактивная электрическая	b	
Проводимость удельная электрическая	γ	
Проводимость в комплексном выражении полная электрическая	Y	
Проницаемость диэлектрическая	ϵ	
Проницаемость магнитная	μ	
Разность фаз тока и напряжения	φ	
Сила намагничивающая (сила магнито-движущая)	F	
Сила электродвижущая	E, e	
Сопротивление активное электрическое	r	
Сопротивление реактивное электрическое	x	
Сопротивление полное электрическое	z	
Сопротивление удельное электрическое	ρ	
Сопротивление в комплексном выражении полное электрическое	Z	
Ток (величина тока)	I, i	
Фаза начальная	ψ	α, β
Частота	f	
Частота угловая	ω	
Число витков обмотки	w	n

УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Наименование	Условные графические изображения
Провод соединительный	
Провода пересекающиеся, электрически не соединенные	
Провода пересекающиеся, электрически соединенные	
Ответвление провода	
Постоянный ток	
Переменный ток	
Переменный ток трехфазной сети	
Постоянный и переменный ток	
Выключатель однополюсный	
Выключатель двухполюсный	
Переключатель однополюсный на два положения	
Переключатель двухполюсный на два положения	
Сопротивление нерегулируемое, общее обозначение (активное, омическое)	
Сопротивление регулируемое, общее обозначение	

Наименование	Условные графические изображения
Сопротивление полное	
Зажимы	
Заземление	
Соединение провода с корпусом	
Предохранитель плавкий	
Высокое напряжение	
Соединение обмоток „звездой“	
Соединение обмоток „треугольником“	
Катушка индуктивности	
Дроссель низкой частоты	
Трансформатор низкой частоты	
Электромагнит	
Конденсатор постоянной емкости	
Конденсатор переменной емкости	

Продолжение

Наименование	Условные графические изображения
Осветительная лампа	
Неоновая лампа	
Нагревательный элемент	
Сухой выпрямитель	
Термоэлемент с прямым подогревом	
Вольтметр	
Амперметр	
Химический источник электрической энергии	
Батарея химических источников электрической энергии	
Генератор электрической энергии	

ВВЕДЕНИЕ

I. Выдающиеся деятели электротехники XIX века

Электротехника — наука, изучающая вопросы, связанные с производством (генерированием), передачей на расстояние и потреблением электрической энергии.

Электрическая энергия нашла самое широкое применение в нашей жизни. Это объясняется тем, что ее можно относительно легко получить в результате преобразования других видов энергии, например, механической, тепловой, химической, весьма быстро и экономично передавать на большие расстояния и рационально использовать.

Начало развития электротехники относится ко второй половине XVIII и первой половине XIX веков.

Весьма важную роль в деле развития электротехники сыграли научные труды гениального русского ученого **М. В. Ломоносова** (1711—1765).

Работы М. В. Ломоносова в области исследования атмосферного электричества на сотню лет опередили научную мысль того времени. В своем знаменитом трактате «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих» он впервые объяснил электрическую сущность грозовых явлений.

Ломоносову принадлежат также работы по физике, химии, астрономии, географии, минералогии, метеорологии. М. В. Ломоносов открыл один из важнейших законов природы — **закон сохранения массы и движения**.

В своих фундаментальных работах по естествознанию М. В. Ломоносов развивал и отстаивал учение о материальности мира и его познаваемости. Материалистический подход к объяснению физических явлений природы, и в частности электрических, оказал плодотворное влияние на развитие научной мысли XIX века.

Будучи пламенным патриотом, М. В. Ломоносов всемерно стремился развивать русскую науку и культуру и неустанно боролся с «неприятелями наук российских».

Наш народ по праву назвал гениального ученого М. В. Ломоносова отцом русской науки.

Большая заслуга в исследовании электрических явлений принадлежит также работавшему вместе с М. В. Ломоносовым русскому академику **Г. В. Рихману** (1711—1753). Рихман создал первый электрический прибор — «электрический указатель», при помощи которого можно было производить количественные измерения электричества. Этот прибор, напоминавший современный электроскоп, использовался Ломоносовым и Рихманом при изучении атмосферного электричества.

Русский ученый академик **Ф. У. Эпинус** (1724—1802) изобрел конденсатор и простейший прибор для получения электричества, названный «электрофором». Заслуга Эпинуса заключается также в том, что он впервые высказал мысль о связи между электрическими и магнитными явлениями.

Итальянский физик **А. Вольт** (1745—1827) изобрел в 1800 г. первый источник гальванического тока и этим положил начало внедрению в электротехнику химических источников электрической энергии.

Выдающийся русский изобретатель академик **В. В. Петров** (1761—1836) сконструировал первую мощную по тому времени батарею химических источников электрической энергии и с помощью ее проделал ряд важнейших опытов по электролитическому, тепловому, световому и физиологическому действию электрического тока.

В 1803 г. В. В. Петров открыл явление электрической дуги и предсказал возможность использования ее для электрического освещения, электрической сварки, получения металлов из их окислов и т. д.

Ряд важнейших электротехнических проблем, выдвинутых Петровым, не мог быть практически применен при жизни ученого, так как в то время еще нельзя было получить достаточного количества электроэнергии.

В. В. Петров впервые применил на практике изолированные провода, что сыграло существенную роль в развитии электротехники.

Наш народ по праву называет академика В. В. Петрова первым русским электротехником.

Немецкий физик **Г. С. Ом** (1787—1854) открыл в 1827 г. один из важнейших законов электротехники, названный законом Ома.

Замечательный английский физик **М. Фарадей** (1791—1867) открыл в 1831 г. явление электромагнитной индукции, сыгравшее важную роль в развитии электротехники.

Талантливый русский изобретатель **П. Л. Шиллинг** (1786—1837) первый в мире применил электрическую энергию в технике связи. В 1832 г. он сконструировал электромагнитный телеграфный аппарат и осуществил первую телеграфную линию связи.

Большой вклад в электротехнику внес знаменитый русский ученый академик **Э. Х. Ленц** (1804—1865), открывший два важнейших закона электротехники.

Первый закон, открытый Э. Х. Ленцем в 1833 г. и вошедший в электротехнику под названием **правила Ленца**, устанавливает связь между электрическими и магнитными явлениями как двумя сторонами единого электромагнитного явления. Применяя этот закон, Ленц в 1838 г. установил одно из важнейших положений практической электротехники — **принцип обратимости электрических машин**.

Второй закон, открытый Ленцем в 1844 г., устанавливает зависимость между количеством тепла, выделяемого током в проводнике, и величиной этого тока. Этот закон вошел в электротехнику под названием **закона Ленца — Джоуля**, так как одновременно с Ленцем он был открыт английским ученым Джоулем.

Большие заслуги в области развития электротехники имеет замечательный русский изобретатель академик **Б. С. Якоби** (1801—1874). В 1834 г. он сконструировал первый **электродвигатель постоянного тока** и успешно применил его на практике.

В 1837 г. Якоби изобрел **гальванопластик** и этим положил начало развитию новой весьма важной отрасли практической электротехники.

Немецкий физик **Г. Р. Кирхгоф** (1824—1887) открыл в 1845 г. законы протекания тока в электрических цепях (**законы Кирхгофа**).

Выдающийся английский ученый **Д. К. Максвелл** (1831—1879) впервые изложил основы теории электромагнитного поля. В 1873 г. он опубликовал «Трактат об электричестве и магнетизме», где изложил свою **электромагнитную теорию света**.

Плодотворную работу в области развития теоретической и практической электротехники провел известный русский ученый, профессор Московского университета **А. Г. Столетов** (1839—1896). В 1872 г. он установил зависимость между намагничиванием ферромагнитного вещества и намагничивающей силой, а в 1889 г. открыл явление **фотоэффекта** и сконструировал прибор, послуживший прототипом современных фотоэлементов.

Замечательный русский изобретатель **П. Н. Яблочков** (1847—1894) изобрел в 1875 г. первый практически пригодный **электросветильный прибор**, получивший название **свечи Яблочкова**.

Работая над проблемой питания электрических свечей переменным током, Яблочков впервые в мире выдвинул и осуществил идею **трансформирования переменного тока**. Его **индукционная катушка**, применяемая для «дробления све-

та», — прототип современных трансформаторов переменного тока.

Одновременно с П. Н. Яблочковым вопросами электрического освещения занимался русский изобретатель **А. Н. Лодыгин** (1847—1923). После многочисленных опытов он в 1874 г. создал первую в мире электрическую лампочку накаливания — прототип современных электрических ламп.

Русский изобретатель лаборант Московского университета **И. Ф. Усагин** (1855—1919) сконструировал в 1882 г. первый мощный трансформатор переменного тока. Изобретение Усагина способствовало широкому внедрению в электротехнику переменного тока и разрешению проблемы передачи электрической энергии на большие расстояния.

Известный русский изобретатель **М. О. Доливо-Добровольский** (1862—1919) сконструировал впервые в электротехнике в 1891 г. трехфазную систему переменного тока, которая до сих пор является стандартной не только в СССР, но и во многих других странах.

Одновременно с этим Доливо-Добровольский изобрел трехфазный асинхронный электродвигатель переменного тока, наиболее распространенный в современной электротехнике.

Немецкий физик **Г. Р. Герц** (1857—1894) экспериментально доказал существование электромагнитных волн и этим подтвердил теоретические выводы, сделанные Максвеллом.

Выдающийся русский ученый **А. С. Попов** (1859—1906) в 1896 г. впервые в мире осуществил радиосвязь и этим положил начало развитию радиотехники. Советский народ гордится тем, что наша страна является родиной радио — этого замечательного изобретения, играющего огромную роль в жизни человеческого общества.

Плеяду прославленных русских электротехников XIX века можно дополнить именами многих других изобретателей и ученых. Например, **А. Т. Болотов** (1738—1833) положил начало применению электричества в медицине (электротерапия). **Ф. А. Пироцкий** (1845—1898) впервые претворил в жизнь идею передачи электроэнергии на расстояние. **Д. А. Лачинов** (1842—1902) дал теоретическое обоснование и основы расчета линий электропередачи и внес ряд ценных предложений в области практической электротехники. **В. Н. Чиколев** (1845—1898) изобрел дуговую лампу с дифференциальным регулятором, **Н. Г. Славянов** (1854—1897) положил начало промышленной электротермии, **Н. А. Умов** (1846—1915) написал ряд научных работ, содействовавших развитию учения об электромагнетизме, **П. Н. Лебедев** (1866—1912) впервые установил явление давления света и этим способствовал окончательному утверждению электромагнитной теории света.

Русская наука XVIII и XIX веков развивалась в очень тяжелых условиях. Господствующие классы царской России не верили в творческие силы русского народа и раболепно преклонялись перед Западом. В правительственных и культурно-просветительных учреждениях было засилье иностранцев, которые часто сознательно тормозили развитие русской науки и культуры.

Однако, невзирая на все эти трудности, русская наука XVIII и XIX веков не только не отставала от зарубежной, но и шла во многом впереди нее.

Великий русский народ выдвинул из своей среды славную плеяду ученых и изобретателей, которые внесли неоценимый вклад в сокровищницу науки. В частности, русские ученые XVIII и XIX веков сыграли большую роль в развитии электротехники, обогатив ее рядом важнейших открытий и изобретений.

II. Советская электротехника

Великая Октябрьская социалистическая революция создала все условия для мощного развития производительных сил нашего народа.

В первые же годы советской власти В. И. Ленин обратил особое внимание на проблему электрификации страны. По указанию В. И. Ленина в 1920 г. была создана Государственная комиссия по электрификации России, которая разработала перспективный план развития электрификации страны (план ГОЭЛРО).

Только в условиях советского общественного строя смог зародиться и осуществиться такой смелый по замыслу, научно обоснованный план снабжения страны электрической энергией.

Ленинские слова: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны» — были с энтузиазмом восприняты советским народом.

Уже к концу 1935 г. план ГОЭЛРО был перевыполнен в два с половиной раза. К этому времени в СССР были сооружены мощные гидроэлектрические станции на Волхове, Свири, Днепре и ряд тепловых электрических станций большой мощности, например, Шатурская, Каширская, Зуевская и др.

Густая сеть линий электропередач высокого напряжения покрыла к этому времени все промышленные районы нашей страны. С каждым днем все глубже и глубже внедрялась электрическая энергия во все отрасли бурно развивающейся социалистической экономики.

В результате успешного выполнения довоенных пятилеток наша страна была превращена в могучую индустриально-колхозную державу. По многим техническим показателям СССР вышел на первое место в мире.

Наглядным показателем индустриализации СССР за годы довоенных пятилеток может служить рост потребления электроэнергии. Если в 1913 г. выработка электроэнергии составляла 1,9 миллиарда киловатт-часов, то в 1928 г. было выработано 5, в 1932 г. — 13,5, в 1937 г. — 36,2 и в 1940 г. — 48,3 миллиарда киловатт-часов, т. е. она возросла примерно в 25 раз по сравнению с 1913 г. — годом наиболее высоких технических показателей дореволюционной России.

В годы Великой Отечественной войны был нанесен большой урон экономике Советского Союза и в особенности его электроэнергетике. Было разрушено 50 крупных электростанций, в том числе Днепровская и Свирская, и более 10 тысяч зданий, принадлежащих электрическим станциям и подстанциям, уничтожено около 10 тысяч километров высоковольтных линий электропередач и много другого электрооборудования.

Враги Советского Союза надеялись на то, что советскому народу потребуется минимум 20 лет, чтобы восстановить экономику страны. Однако они жестоко просчитались, так как не учли преимуществ советского общественного и государственного строя перед капиталистическим.

В ходе самой войны уже шла интенсивная работа на востоке страны по созданию новой энергетической базы. За годы войны мощность электростанций Урала выросла более чем в 2 раза, Кузбасса — в 1,7 раза, Караганды — в 4,1 раза, Узбекистана — в 1,9 раза.

В послевоенные же годы советский народ под руководством Коммунистической партии сумел не только быстро ликвидировать тяжелые последствия войны, но и шагнуть далеко вперед по пути дальнейшего подъема социалистической экономики. К 1950 г. было закончено восстановление электростанций, разрушенных во время войны, и создан ряд новых крупных электростанций. Выработка электроэнергии в СССР превысила уровень 1940 г. на 87%. По производству электроэнергии СССР вышел на первое место в Европе и на второе в мире. В дальнейшем производство электроэнергии в СССР бурно возрастало с каждым годом. Так, например, в 1951 г. было выработано 104, в 1952 г. — 117, в 1953 г. — 133, в 1954 г. — 148, в 1955 г. — 166, в 1956 г. — 192 и в 1957 г. — 210 миллиардов киловатт-часов энергии.

В 1954 г. в СССР была пущена в эксплуатацию первая в мире атомная электростанция мощностью в 5000 квт. Таким образом, атомная энергия впервые в истории человечества была применена в промышленных целях в СССР и стала служить не войне, не смерти, не уничтожению культурных ценностей, а делу мирного созидательного труда.

XX съезд Коммунистической партии Советского Союза в своих директивах по пятилетнему плану развития СССР на 1956—1960 гг. наметил план дальнейшего, еще более мощного подъема

социалистической экономики и, в частности, развития электрификации страны.

Директивами XX съезда партии предусмотрено увеличение общей мощности турбинных электростанций к концу шестой пятилетки примерно в 2,2 раза, гидроэлектрических станций — в 2,7 раза, увеличение мощности атомных электростанций до 2—2,5 миллионов киловатт и выработки электроэнергии до 320 миллиардов киловатт-часов.

Задачи, поставленные партией и правительством СССР перед советским народом, успешно им выполняются. В 1957 г. уже вступила в строй пущенная на полную мощность Куйбышевская ГЭС, которая в настоящее время является самой мощной электростанцией в мире. Мощность всех ее двадцати гидрогенераторов составляет 2,1 миллиона киловатт. В средний по водности год эта станция будет вырабатывать примерно 10 миллиардов киловатт-часов энергии.

В конце шестой пятилетки вступит в строй строящаяся ныне Сталинградская ГЭС. Она будет развивать полную мощность, равную 2,31 миллиона киловатт, и вырабатывать в год несколько более 10 миллиардов киловатт-часов энергии.

Одновременно с волжскими гидроэлектростанциями развернуто строительство ряда других мощных гидроэлектростанций, которые будут введены в строй в шестой пятилетке. Среди них особое внимание привлекает к себе Братская гидроэлектрическая станция, строящаяся ныне в Сибири. Полная мощность этой гидроэлектростанции будет доведена до 3 миллионов 200 тысяч киловатт.

В шестой пятилетке предусмотрено сооружение единой энергетической системы с линией электропередачи напряжением 400 киловольт путем объединения Куйбышевской и Сталинградской гидроэлектростанций с Центральной, Южной и Уральской энергосистемами.

Благодаря широкому внедрению электрической энергии в промышленность, сельское хозяйство, транспорт и домашний быт многие районы СССР стали районами сплошной электрификации. Сельскохозяйственный труд в нашей стране постепенно превращается в разновидность индустриального труда, и таким образом постепенно стирается противоположность между городом и деревней.

В настоящее время СССР занимает второе место в мире по выработке электроэнергии. Перспективным планом развития электрификации СССР намечено в ближайшие десять — пятнадцать лет довести выработку электроэнергии в год примерно до 800—900 миллиардов киловатт-часов. И нет никакого сомнения в том, что в ближайшие годы СССР догонит и перегонит США в выработке электроэнергии в год и прочно завоюет первое место в мире.

Передовая советская наука достигла в наши дни такого высокого уровня развития, что по многим вопросам значительно опередила науку самых развитых капиталистических стран.

Удачный запуск искусственных спутников земли, постройка в кратчайший срок самой мощной в мире Куйбышевской гидроэлектростанции, постройка первой в мире атомной электростанции и т. д.— все это является наглядным доказательством роста советской науки и техники.

В настоящее время по уровню развития науки и техники, по количеству высококвалифицированных кадров специалистов, по оснащенности народного хозяйства самой разнообразной техникой Советский Союз занимает одно из первых мест в мире. Благодаря этому самые сложные производственно-технические проблемы могут решаться теперь нашими учеными и техниками, нашей промышленностью самостоятельно, своими собственными силами.

Впереди еще много нерешенных задач. Внимание Коммунистической партии, Советского правительства, всего советского народа направлено на то, чтобы как можно успешнее решить эти задачи. Партия и народ, полные глубокой веры в свои созидательные силы, уверенно идут по пути дальнейшего развития и упрочения социалистического хозяйства, по пути строительства коммунизма.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ГЛАВА I

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

§ 1. МАТЕРИЯ И ЕЕ ДВИЖЕНИЕ

Марксистский философский материализм исходит из того, что мир по своей природе материален, т. е. природа во всем ее бесконечном разнообразии есть проявление единой, вечно существующей и движущейся материи.

В. И. Ленин дает такое философское определение материи: «Материя есть философская категория для обозначения объективной реальности, которая дана человеку в ощущениях его, которая копируется, фотографируется, отображается нашими ощущениями, существуя независимо от них» (В. И. Ленин. Соч., т. 14, стр. 117).

Следовательно, материя в философском смысле этого слова есть понятие наиболее общее, «охватывающее весь мир в целом, во всем его бесконечном многообразии».

Философское понятие материи не следует отождествлять с общеупотребительным в естествознании понятием вещества.

Современная наука, исходя из диалектического материализма, установила, что вещество не является единственно возможной формой материи и что наряду с веществом существуют иные виды материи — физические поля. К последним относятся: электромагнитное поле, поле тяготения (гравитационное поле) и ядерное поле, имеющееся в ядрах атомов. В частности, свет является особым видом материи, и он не менее материален, чем любые вещественные тела, состоящие из атомов, молекул и т. д.

Материя обладает бесконечным разнообразием свойств, из которых основным является ее движение.

Материя без движения так же немыслима, как и движение без материи.

Движение материи осуществляется в самых разнообразных формах, начиная от простейших — механического движения физических тел — и кончая ее сложнейшими формами — органиче-

ской жизнью природы и сознательной деятельностью человека. Следовательно, под движением материи в философском смысле этого слова надо понимать не только простое механическое перемещение физических тел, но изменяемость материи вообще, переход ее от одних форм существования к другим.

Так как материя не исчезает и не создается вновь, то и движение материи, как внутренне присущий ей способ существования, вечно и неуничтожимо.

Движущаяся материя существует в пространстве и времени.

Было время, когда в науке господствовало ньютоновское представление о пространстве и времени, согласно которому под пространством понималась абсолютная пустота, заполненная физическими телами, а время считалось чем-то таким, что течет само по себе независимо от физических процессов в природе.

Диалектический материализм отверг идеалистическое представление Ньютона о пространстве и времени, указав, что пространство и время — объективные формы существования материи, проявляющиеся в протяженности материальных тел и длительности физических процессов.

Всякий материальный объект, будь то физическое вещественное тело или такой вид материи, как электромагнитное поле, обладает массой.

О величине массы всякого материального объекта судят по его инертности, которую он проявляет при своем движении. Этой инертностью обладает и световой поток как некоторое материальное образование, а поэтому свет, как и всякое вещественное тело, обладает массой.

Установлено, что относительно большие по своим размерам физические тела, называемые обычно макротелами, имеют массу, независимую от скорости движения их в пространстве. Что же касается мельчайших материальных частиц, называемых обычно микрочастицами, то у них масса зависит от скорости их движения.

В отличие от вещественных микрочастиц «элементарная частица» электромагнитного поля, например света — фотон, не обладает «массой покоя», и присущая ему масса — это «масса движения». Это значит, что свет как вид материи не существует в состоянии покоя. Всякое прекращение движения света связано с исчезновением его, с качественным превращением его в иные виды материи и иные формы материального движения, например атомно-молекулярное (тепловое) движение вещества. Последнее явление мы можем наблюдать, например, в случае преграждения движения света с помощью веществ, интенсивно поглощающих световые лучи.

Способность материи к самодвижению, к видоизменению форм своего движения ха-

рактируется энергией, присущей каждой форме материального движения.

Энергии в чистом виде, т. е. независимой от материи и ее движения, в природе нет и быть не может, так как **энергия есть мера движения материи.**

О том, как изменяется качественно и количественно данная форма материального движения, мы можем судить по изменениям энергии, присущей данному движению.

Так как в природе существуют качественно различные формы движения материи, то, естественно, должны существовать и качественно различные виды энергии. Например, при механическом движении материальных тел проявляется механическая энергия, при химической реакции — химическая энергия, при молекулярно-атомном движении — тепловая энергия, при ядерных реакциях внутри атомов — атомная энергия, при электромагнитной форме движения материи — электромагнитная энергия и т. д.

Важнейший закон природы — закон сохранения энергии — свидетельствует о том, что при всяких физико-химических процессах, сопровождаемых переходом одних видов энергии в другие, общее количество энергии сохраняется неизменным. А так как энергия есть мера движения материи, то этот закон является частным случаем более общего закона природы — **закона сохранения материи и ее движения.**

Современная наука установила, что между массой материальных тел и энергией, присущей им, существует строго определенная связь, а именно — всякое изменение массы материального тела связано с изменением его энергии. Если энергия тела убывает, то в соответствии с этим убывает масса тела, и, наоборот, с ростом массы тела растет его энергия.

Необходимо особо подчеркнуть, что убыль массы материальной частицы при отдаче ею энергии нельзя рассматривать как превращение материи в энергию, что безуспешно пытаются доказать некоторые физики-идеалисты. Надо помнить, что **при всякого рода превращениях одной формы движения материи в другую сохраняется неизменным общее количество как массы материальных объектов, так и присущей им энергии.** Может изменяться только вид массы и в соответствии с этим и вид энергии.

Среди разнообразнейших форм движения материи особый интерес для электротехники представляет электромагнитная форма движения материи, называемая электромагнитным явлением.

Мерой всякого электромагнитного движения является присущая ему электромагнитная энергия.носителем этой энергии является электромагнитное поле как некоторый вид материи.

Хотя электромагнитное поле как некоторый вид материи качественно отличается от вещества, однако, как мы увидим далее,

оно может преобразовываться в вещество и, наоборот, возникать за счет вещества.

Взаимопревращаемость вещества в поле и обратно подтверждает одно из основных положений диалектического материализма — о всеобщей связи вещей и явлений природы. Связь электромагнитного поля и вещества свидетельствует об общности свойств этих двух видов материи.

Установлено, что свет (электромагнитное поле) как некоторый вид материи обладает двойкой, противоречивой природой.

В одних случаях он обнаруживает непрерывность, проявляющуюся в волновом характере движения, а в других — прерывность (дискретность), проявляющуюся в потоке движущихся «элементарных» частиц электромагнитного поля — фотонов, обладающих квантами (порциями) энергии. Волновые свойства света наиболее резко проявляются при его распространении, а дискретность (прерывность) — при излучении и поглощении его разного рода веществами.

Изучение глубокой взаимосвязи между светом и веществом позволило установить, что и вещественные микрочастицы представляют по своей природе единство противоречивых свойств — прерывности и непрерывности. Согласно представлениям современной физики всякая вещественная микрочастица, помимо своих прерывных свойств, обладает еще явно выраженными волновыми свойствами. Например, поток таких вещественных частиц, как электроны, обладает волновыми свойствами, аналогичными волновым свойствам светового потока. На использовании волновых свойств электронного потока основано устройство электронных микроскопов, широко применяемых в науке и технике.

Электромагнитное поле и вещество как две разновидности материи находятся в тесном взаимодействии друг с другом. Под действием электромагнитного поля на вещество в последнем возникают разнообразнейшие формы материального движения, например тепловое движение, химическое, механическое и др. Электромагнитное поле, действуя на электропроводящие вещества, например металлы, заставляет перемещаться находящиеся в них электрические заряды.

Явление направленного, упорядоченного движения электрических зарядов в проводящих веществах, возникающее под действием на них электромагнитного поля, называется электрическим током.

Когда в электропроводящих веществах возникает электрический ток, то одновременно там происходят и иные физические процессы, например тепловые, химические и т. д. Следовательно, в общем случае явление электрического тока — это сложный комплекс разнообразнейших физических процессов. Однако под электрическим током в узком смысле этого слова подразуме-

вается направленное и упорядоченное движение электрических зарядов в электропроводящих веществах, происходящее под влиянием сил электромагнитного поля. В этом смысле мы и будем в дальнейшем применять термин «электрический ток».

Чтобы понять природу электрического тока как некоторой своеобразной формы материального движения, необходимо ознакомиться с теми элементарными вещественными частицами, которые служат носителями электрических зарядов. Для этого рассмотрим основные положения современной электронной теории строения вещества.

§ 2. ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Все физические тела природы построены из разновидности материи, называемой **веществом**.

Вещества подразделяются на две основные группы — вещества простые и сложные.

Сложными веществами называются такие вещества, которые путем химических реакций могут быть разложены на другие, более простые вещества.

В отличие от сложных простыми веществами называются такие, которые химическим путем не могут быть разложены на еще более простые вещества.

Примером сложного вещества может служить вода, которая путем химической реакции может быть разложена на два других, более простых вещества — водород и кислород. Что же касается последних двух, то они химическим путем уже не могут быть разложены на более простые вещества, а поэтому являются простыми веществами, или, иначе, **химическими элементами**.

В первой половине XIX века в науке существовало предположение, что химические элементы являются неизменными веществами, не имеющими общей связи друг с другом. Однако выдающийся русский ученый **Д. И. Менделеев** (1834—1907) впервые в 1869 г. выявил диалектическую связь химических элементов, показав, что качественная характеристика каждого из них находится в зависимости от его количественной характеристики — атомного веса.

Изучая свойства химических элементов, Д. И. Менделеев подметил, что свойства их периодически повторяются в зависимости от их атомного веса. Эту периодичность он отобразил в форме таблицы, вошедшей в науку под названием «Периодическая система элементов Менделеева».

Своим открытием периодического закона химических элементов Д. И. Менделеев положил начало новой эпохе в развитии естествознания.

Ниже приведена современная периодическая таблица химических элементов Менделеева, содержащая сто один элемент. Тринадцать из них, в том числе девять элементов так называемой

Периодическая таблица

		Г Р У П П Ы				
		I	II	III	IV	V
П Е Р И О Д Ы	1	1 H Водород 1,008				
	2	Li 3 Литий 6,9	Be 4 Бериллий 9	5 B Бор 10,8	6 C Углерод 12	7 N Азот 14
	3	Na 11 Натрий 23	Mg 12 Магний 24,3	13 Al Алюминий 27	14 Si Кремний 28,1	15 P Фосфор 31
	4	K 19 Калий 39,1	Ca 20 Кальций 40,1	Sc 21 Скандий 45	Ti 22 Титан 47,9	V 23 Ванадий 51
		29 Cu Медь 63,5	30 Zn Цинк 65,4	31 Ga Галлий 69,7	32 Ge Германий 72,6	33 As Мышььяк 74,9
	5	Rb 37 Рубидий 85,5	Sr 38 Стронций 87,6	Y 39 Иттрий 88,9	Zr 40 Цирконий 91,2	Nb 41 Ниобий 92,9
		47 Ag Серебро 107,9	48 Cd Кадмий 112,4	49 In Индий 114,8	50 Sn Олово 118,7	51 Sb Сурьма 121,8
6	Cs 55 Цезий 132,9	Ba 56 Барий 137,4	La 57* Лантан 138,9	Hf 72 Гафний 178,6	Ta 73 Тантал 180,9	
	79 Au Золото 197,0	80 Hg Ртуть 200,6	81 Tl Таллий 204,4	82 Pb Свинец 207,2	83 Bi Висмут 209	
7	Fr 87 Франций (223)	Ra 88 Радий 226	Ac 89** Актиний (227)	Th 90 Торий 232,1	Pa 91 Протактиний 231	

* Р Е Д К О З Е М Е Л Ь Н Ы Е

Ce 58 Церий 140,1	Pr 59 Празеодим 140,9	Nd 60 Неодим 144,3	Pm 61 Прометий (145)	Sm 62 Самарий 150,4
Tb 65 Тербий 159	Dy 66 Диспрозий 162,5	Ho 67 Гольмий 164,9	Er 68 Эрбий 167,2	Tu 69 Тулий 169

** Т Р А Н С У Р А Н О В Ы Е

Np 93 Нептуний (237)	Pu 94 Плутоний (242)	Am 95 Америций (243)	Cm 96 Кюрий (245)	Bk 97 Беркелий (249)
-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------

Э Л Е М Е Н Т О В						
VI		VII		VIII		0
						He 2 <i>Гелий</i> 4
8 O <i>Кислород</i> 16	9 F <i>Фтор</i> 19					Ne 10 <i>Неон</i> 20,2
16 S <i>Сера</i> 32,1	17 Cl <i>Хлор</i> 35,5					Ar 18 <i>Аргон</i> 39,9
Cr 24 <i>Хром</i> 52	Mn 25 <i>Марганец</i> 54,9	Fe 26 <i>Железо</i> 55,9	Co 27 <i>Кобальт</i> 58,9	Ni 28 <i>Никель</i> 58,7		
34 Se <i>Селен</i> 79	35 Br <i>Бром</i> 79,9					Kr 36 <i>Криптон</i> 83,8
Mo 42 <i>Молибден</i> 98	Tc 43 <i>Технеций</i> (99)?	Ru 44 <i>Рутений</i> 101,7	Rh 45 <i>Родий</i> 102,9	Pd 46 <i>Палладий</i> 106,7		
52 Te <i>Теллур</i> 127,6	53 J <i>Иод</i> 126,9					Xe 54 <i>Ксенон</i> 131,3
W 74 <i>Вольфрам</i> 183,9	Re 75 <i>Рений</i> 186,3	Os 76 <i>Осмий</i> 190,2	Ir 77 <i>Иридий</i> 192,2	Pt 78 <i>Платина</i> 195,2		
84 Po <i>Полоний</i> (209)	85 At <i>Астатин</i> (210)					Rn 86 <i>Радон</i> (222)
U 92** <i>Уран</i> 238,1						

Э Л Е М Е Н Т Ы

Eu 63 <i>Европий</i> 152	Gd 64 <i>Гадолиний</i> 156,9
Yb 70 <i>Иттербий</i> 173	Lu 71 <i>Лютеций</i> 175

Э Л Е М Е Н Т Ы

Cf 98 <i>Калифорний</i> (249)	En 99 <i>Эйнштейний</i> 253	Fm 100 <i>Фермий</i> 255	Mv 101 <i>Менделевий</i> 256
--------------------------------------------	------------------------------------------	---------------------------------------	-------------------------------------------

заурановой группы (элементы, расположенные в периодической таблице за ураном), были созданы искусственно.

§ 3. АТОМЫ

Согласно современным представлениям науки каждый химический элемент состоит из совокупности мельчайших материальных (вещественных) частиц, называемых атомами.

Атомом называется самая малая доля химического элемента, которая уже не может быть разложена химическим путем на другие, более мелкие и простые материальные частицы.

Атомы различных по своей природе химических элементов отличаются друг от друга своими физико-химическими свойствами, структурой, размерами, массой, атомным весом, собственной энергией и некоторыми иными свойствами. Например, атом водорода резко отличается по своим свойствам и структуре от атома кислорода, а последний — от атома урана и т. д.

Установлено, что атомы химических элементов чрезвычайно малы по своим размерам. Если условно принять, что атомы имеют шарообразную форму, то поперечники их должны быть равны стомиллионным долям сантиметра. Например, поперечник атома водорода — самого маленького атома в природе — равен одной стомиллионной доле сантиметра (10^{-8} см), а поперечники самых больших атомов, например атома урана, не превышают трех стомиллионных долей сантиметра ($3 \cdot 10^{-8}$ см). Следовательно, атом водорода во столько раз меньше шарика радиусом в один сантиметр, во сколько последний меньше земного шара.

В соответствии с весьма малыми размерами атомов их масса также очень мала. Например, масса атома водорода равна $m = 1,67 \cdot 10^{-24}$ г. Это значит, что в одном грамме водорода содержится примерно $6 \cdot 10^{23}$ атомов.

За условную единицу измерения атомных весов химических элементов принята $\frac{1}{16}$ часть веса атома кислорода. В соответствии с этим атомным весом химического элемента называют отвлеченное число, показывающее, во сколько раз вес данного химического элемента больше $\frac{1}{16}$ части веса атома кислорода.

В периодической таблице элементов Д. И. Менделеева приведены атомные веса всех химических элементов (см. число, помещенное под названием элемента). Из этой таблицы мы видим, что наиболее легким атомом является атом водорода, имеющий атомный вес 1,008. Атомный вес углерода равен 12, кислорода — 16 и т. д. Что же касается более тяжелых химических элементов, то их атомный вес превышает атомный вес водорода более чем в двести раз. Так, атомный вес ртути равен 200,6, радия — 226

и т. д. Чем выше порядок номера, занимаемого химическим элементом в периодической системе элементов, тем больше его атомный вес.

Большая часть атомных весов химических элементов выражается дробными числами. Это в известной мере объясняется тем, что такие химические элементы состоят из совокупности нескольких сортов атомов, обладающих различными атомными весами, но одинаковыми химическими свойствами.

Химические элементы, занимающие одинаковый номер в периодической системе элементов, а следовательно, обладающие одинаковыми химическими свойствами, но различными атомными весами, называются изотопами.

Изотопы найдены у большинства химических элементов. Хлор имеет два изотопа, кальций — четыре, цинк — пять, олово — одиннадцать и т. д. Многие изотопы получены искусственным путем, среди них некоторые имеют большое практическое значение.

§ 4. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ ВЕЩЕСТВА

Долгое время считалось, что атомы химических элементов являются пределом делимости вещества, т. е. как бы элементарными «кирпичиками» мироздания. Современная наука отвергла эту гипотезу, установив, что атом любого химического элемента представляет собой совокупность еще более мелких материальных частиц, чем сам атом.

Согласно электронной теории строения вещества атом любого химического элемента представляет собой систему, состоящую из центрального ядра, вокруг которого вращаются «элементарные» вещественные частицы, называемые электронами.

Ядра атомов, согласно общепринятым взглядам, впервые высказанным советским ученым Д. Д. Иваненко, состоят из совокупности «элементарных» вещественных частиц — **протонов и нейтронов.**

Чтобы понять строение атомов и физико-химические процессы в них, необходимо хотя бы вкратце ознакомиться с основными характеристиками элементарных частиц, входящих в состав атомов.

Установлено, что электрон — это вещественная частица, обладающая самым малым наблюдаемым в природе отрицательным электрическим зарядом.

В начале XX века существовало убеждение в том, что электрон — это частица, имеющая строго определенную и неизменяемую форму, объем, массу.

Однако уже в 1908 г. В. И. Ленин в своей книге «Материализм и эмпириокритицизм» с гениальной прозорливостью пред-

сказал, что электрон не так прост, как это казалось физикам XX века. «Электрон,— писал Ленин,— так же неисчерпаем, как и атом, природа бесконечна...» «...исчезает тот предел, до которого мы знали материю до сих пор, наше знание идет глубже...» (В. И. Ленин. Материализм и эмпириокритицизм. Соч., т. 14, изд. 4, стр. 247 и 249).

Современная наука полностью подтвердила высказанную Лениным мысль о неисчерпаемости электрона, раскрыв богатое физическое содержание этой «элементарной» частицы материи.

Если условно считать, что электрон как частица имеет шарообразную форму, то поперечник электрона должен быть равным $4 \cdot 10^{-18}$ см, т. е. он меньше поперечника любого атома в десятки тысяч раз.

Электрон, как и всякая иная вещественная частица, обладает массой. «Масса покоя» электрона, т. е. та масса, которой он обладает в состоянии относительного покоя, равна $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г.

Исключительно малая «масса покоя» электрона свидетельствует о том, что инертные свойства электрона проявляются исключительно слабо, а это значит, что электрон под влиянием переменной электрической силы может колебаться в пространстве с частотой во много миллиардов периодов в секунду.

Масса электрона настолько мала, что для получения одного грамма электронов их потребовалось бы взять 10^{27} единиц. Чтобы иметь хотя бы некоторое физическое представление об этом колоссально большом числе, приведем такой пример. Если бы можно было один грамм электронов расположить на прямой линии вплотную друг к другу, то они образовали бы цепочку длиной в четыре миллиарда километров.

Масса электрона, как и всякой иной вещественной микрочастицы, зависит от скорости его движения. Электрон, находясь в состоянии относительного покоя, обладает «массой покоя», имеющей механическую природу, как и масса всякого физического тела. Что же касается «массы движения» электрона, увеличивающейся с ростом скорости его движения, то она электромагнитного происхождения. Она обусловлена наличием у движущегося электрона электромагнитного поля как некоторого вида материи, обладающего массой и электромагнитной энергией. Чем быстрее движется электрон, тем больше проявляются инерционные свойства его электромагнитного поля, тем, следовательно, больше масса последнего и соответственно электромагнитная энергия его. Так как электрон со своим электромагнитным полем составляет единую, органически связанную материальную систему, то естественно, что массу движения электромагнитного поля электрона можно непосредственно приписать самому электрону.

Зависимость величины массы электрона, как и всякой иной

микрочастицы, от скорости его движения определяется следующей формулой:

$$m_v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1)$$

где m_v — масса движущегося электрона в граммах;

m_0 — «масса покоя» электрона в граммах;

v — скорость движения электрона в сантиметрах в секунду;

$c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек — скорость света.

Пример 1. Электрон имеет «массу покоя» $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-28}$ г. Определить, какова будет масса электрона, если скорость его относительного движения достигнет 0,865 доли скорости света.

Решение. Применяя формулу (1), находим

$$m_v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{9,1 \cdot 10^{-28}}{\sqrt{1 - \frac{(0,865 \cdot 3 \cdot 10^{10})^2}{(3 \cdot 10^{10})^2}}} = 18,2 \cdot 10^{-28} \text{ г},$$

т. е. масса электрона в этом случае возросла в 2 раза.

Как было сказано выше, электрон, помимо свойств частицы, обладает и волновыми свойствами. Опытным путем установлено, что поток электронов, подобно световому потоку, распространяется в форме волнообразного движения. Характер волнового движения электронного потока в пространстве подтверждается явлениями интерференции и дифракции электронных волн. Интерференция электронов — это явление наложения электронных волн друг на друга, а дифракция электронов — это явление огибания электронными волнами краев узкой щели, сквозь которую проходит электронный поток.

Следовательно, электрон — это не просто частица, а «частица-волна», длина которой зависит от массы и скорости движения электрона.

Установлено, что электрон, помимо своего поступательного движения, совершает еще и вращательное движение вокруг своей оси. Этот вид движения электрона получил название «спина» (от английского слова «спин» — веретено). В результате такого движения электрон, кроме электрических свойств, обусловленных электрическим зарядом, приобретает еще и магнитные свойства, напоминая в этом отношении элементарный магнетик.

В заключение отметим, что о строении электрона, о форме существования материи в нем современной науке пока еще ничего неизвестно. Однако нет сомнения в том, что наука будущего сумеет распознать его внутреннее содержание, так как в природе нет непознаваемых вещей, а есть только вещи, еще непознанные, которые впоследствии будут раскрыты и познаны силами науки и техники.

Как было упомянуто выше, в состав ядер атомов входят «элементарные» вещественные частицы — протоны и нейтроны.

Протон — это вещественная частица, обладающая положительным электрическим зарядом, равным по абсолютной величине электрическому заряду электрона.

Масса протона равна $1,67 \cdot 10^{-24}$ г, т. е. она примерно в 1840 раз больше «массы покоя» электрона.

В отличие от электрона и протона, нейтрон не обладает электрическим зарядом, т. е. он является электронейтральной «элементарной» частью вещества.

Масса нейтрона практически равна массе протона.

Электроны, протоны и нейтроны, находясь в составе атомов, взаимодействуют друг с другом. В частности, электроны и протоны взаимно притягиваются друг к другу как частицы, обладающие разноименными электрическими зарядами. Одновременно с этим электрон от электрона и протон от протона отталкиваются как частицы, обладающие одноименными электрическими зарядами. Взаимодействие всех этих электрически заряженных частиц происходит через их электрические поля. Эти поля представляют собой особый вид материи, состоящей из совокупности элементарных материальных частиц, называемых фотонами. Каждый фотон обладает строго определенным присущим ему количеством энергии (квантом энергии). Взаимодействие электрически заряженных материальных вещественных частиц осуществляется путем обмена их друг с другом фотонами. Сила взаимодействия электрически заряженных частиц обычно называется электрической силой.

Нейтроны и протоны, находящиеся в ядрах атомов, также взаимодействуют друг с другом. Однако это взаимодействие их осуществляется уже не через электрическое поле, так как нейтрон — электронейтральная частица вещества, а через так называемое ядерное поле.

Это поле также представляет собой особый вид материи, состоящей из совокупности элементарных материальных частиц, называемых мезонами. Взаимодействие нейтронов и протонов осуществляется путем обмена их друг с другом мезонами. Сила взаимодействия нейтронов и протонов друг с другом называется ядерной силой.

Установлено, что ядерные силы действуют в ядрах атомов в пределах исключительно малых расстояний — примерно 10^{-13} см.

Ядерные силы значительно превосходят по своей величине электрические силы взаимного отталкивания протонов в ядре атома. Это приводит к тому, что они в состоянии не только преодолеть внутри ядер атомов силы взаимного отталкивания протонов, но и создать из совокупности протонов и нейтронов весьма прочные системы ядер. Устойчивость ядра каждого

атома зависит от соотношения двух противоречивых сил — ядерных (взаимное притяжение протонов и нейтронов) и электрических (взаимное отталкивание протонов).

Мощные ядерные силы, действующие в ядрах атомов, способствуют превращению нейтронов и протонов друг в друга. Эти взаимопревращения нейтронов и протонов осуществляются в результате выделения или поглощения ими более легких элементарных частиц, например мезонов.

Мезоны имеют несколько разновидностей. К ним относятся: μ -мезоны (мю-мезоны), имеющие отрицательный электрический заряд, равный заряду электрона, а массу больше «массы покоя» электрона в 200 раз, π -мезоны (пи-мезоны), имеющие положительный электрический заряд, а массу больше «массы покоя» электрона в 280 раз. Существуют мезоны, являющиеся электронейтральными частицами, мезоны, имеющие массу в 1200 раз больше «массы покоя» электрона, и ряд других мезонов.

Опытом установлено, что мезоны способны к качественным превращениям. Например, μ -мезон, просуществовав в свободном состоянии две миллионные доли секунды, превращается в элементарные материальные частицы: позитрон и два нейтрино. Эти частицы не содержались в μ -мезоне в готовом виде, они возникли в результате перехода одной формы существования материи в другую, качественно иную, форму.

Позитрон — это вещественная частица, обладающая положительным электрическим зарядом, равным по абсолютной величине заряду электрона. Масса же позитрона равна массе электрона.

Нейтрино — вещественная частица, обладающая массой, значительно меньшей, чем «масса покоя» электрона, и не имеющая электрического заряда. В науке имеются неопровержимые доказательства существования этой материальной частицы в природе. Однако вследствие своей электронейтральности и исключительно малой массы она до сих пор еще в опыте непосредственно не была наблюдаема.

Опытом установлено, что при радиоактивных явлениях наблюдается испускание радиоактивными элементами так называемых гамма-лучей. Характерной особенностью этих лучей является то, что их фотоны обладают относительно большим количеством (квантом) энергии. Так как гамма-фотон не имеет электрического заряда, то он может относительно свободно подойти к ядру атома. Здесь он попадает в сферу влияния мощных ядерных сил, под действием которых переходит в пару вещественных частиц — электрон и позитрон, прекращая свое существование. Таким образом, невещественная материальная частица — гамма-фотон превратилась под влиянием ядерных сил в пару вещественных частиц. Вновь «рожденный» электрон про-

должает свое существование, как и всякий обычный электрон. Что же касается позитрона, то продолжительность его самостоятельного существования весьма невелика. Спустя незначительную долю секунды после возникновения он соединяется с первым же встречным электроном, образуя совместно с ним неведущественные материальные частицы — фотоны (кванты света).

Здесь мы не можем привести полный перечень всех «элементарных» частиц, открытых современной физикой. Однако вышеизложенные краткие сведения о некоторых из них вполне достаточны для того, чтобы составить простейшее представление о строении вещества.

В заключение отметим, что рассмотренные нами частицы названы элементарными потому, что они не состоят из совокупности других, более простых частиц материи. Но в то же время не надо забывать, что они способны превращаться друг в друга, возникать за счет друг друга. Таким образом, эти частицы являются некоторыми сложными образованиями, т. е. их элементарность условна.

§ 5. СТРОЕНИЕ АТОМОВ

Простейшим по своему устройству атомом является атом водорода. Он состоит из совокупности только двух элементарных частиц — протона и электрона.

Протон в системе атома водорода играет роль центрального ядра, вокруг которого по некоторой орбите вращается электрон. На рис. 1 схематически показана модель атома водорода. Эта



Рис. 1. Схема строения атома водорода

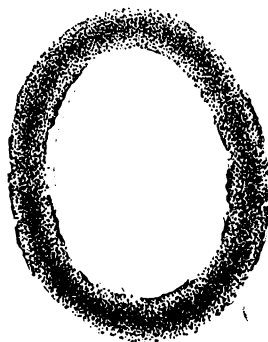


Рис. 2. Атом водорода (движение электрона вокруг ядра в среднем за относительно большой промежуток времени)

модель — только грубое приближение к действительности. Дело в том, что электрон как «частица-волна» не обладает резко ограниченным от внешней среды объемом. А это значит, что сле-

дует говорить не о некоторой точной линейной орбите электрона, а о своеобразном электронном облачке (рис. 2). При этом электрон чаще всего занимает некоторую среднюю линию в облачке, являющуюся одной из возможных орбит его в атоме.

Надо сказать, что и сама орбита электрона не является строго неизменной и неподвижной в атоме — она тоже в силу изменения массы электрона совершает некоторое вращательное движение. Следовательно, движение электрона в атоме носит относительно сложный характер.

Так как ядро атома водорода (протон) и вращающийся вокруг него электрон обладают разноименными электрическими зарядами, то они взаимно притягиваются. Одновременно с этим электрон, вращаясь вокруг ядра атома, развивает центробежную силу, стремящуюся удалить его от ядра. Следовательно, электрическая сила взаимного притяжения ядра атома и электрона и центробежная сила, действующая на электрон, — силы противоречивые. При равновесии их электрон занимает относительно устойчивое положение на некоторой орбите в атоме. Но так как масса электрона очень мала, то для уравнивания силы притяжения к ядру атома он должен вращаться с громадной скоростью, равной примерно $6 \cdot 10^{15}$ оборотам в секунду. Это значит, что электрон в системе атома водорода, как и во всяком ином атоме, движется по своей орбите с линейной скоростью, превышающей тысячу километров в секунду.

В нормальных условиях электрон вращается в атоме водорода по наиболее близко расположенной к ядру орбите. При этом он обладает минимальным возможным количеством энергии. Если же по тем или иным причинам, например под воздействием каких-либо иных материальных частиц, вторгнувшихся в систему атома, электрон перейдет на более удаленную от ядра атома орбиту, то он уже будет обладать несколько большим количеством энергии. Однако на этой новой орбите электрон обычно пребывает ничтожно малое время, после чего он снова возвращается на ближайшую к ядру атома орбиту. При этом переходе он отдает излишек своей энергии в виде кванта электромагнитного излучения — лучистой энергии (рис. 3).

Чем больше получает извне энергии электрон, тем на более удаленную от ядра атома орбиту он переходит и тем большее количество электромагнитной энергии он излучает, когда возвращается на ближайшую к ядру орбиту. Измеряя количество энергии, излучаемой электроном при переходе с различных ор-

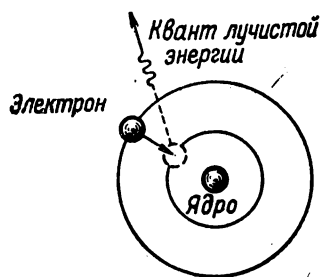


Рис. 3. Электрон при переходе с далекой орбиты на более близкую к ядру атома излучает квант лучистой энергии

бит на ближайшую к ядру атома, удалось установить, что электрон в системе атома водорода, как и в системе любого иного атома, может переходить не на любую произвольную орбиту, а на строго определенную в соответствии с той энергией, которую он получает под действием внешней силы. Орбиты, которые может занимать электрон в атоме, называются *д о з в о л е н н ы м и о р б и т а м и*.

Так как положительный заряд ядра атома водорода (заряд протона) и отрицательный заряд электрона численно равны, то суммарный их заряд равен нулю. Это значит, что атом водорода, находясь в нормальном состоянии, является электронейтральной частицей. Как мы увидим далее, это справедливо для атомов всех химических элементов: атом любого химического элемента, находящийся в нормальном состоянии, является электронейтральной частицей из-за численного равенства его положительных и отрицательных зарядов.

Поскольку в состав ядра атома водорода входит только одна «элементарная» частица — протон, то так называемое массовое число этого ядра равно единице. Массовым числом ядра атома любого химического элемента называется общее число протонов и нейтронов, входящих в состав этого ядра.

Природный водород в основном состоит из совокупности атомов с массовым числом, равным единице. Однако в составе его имеется и другой сорт атомов водорода, с массовым числом, равным двум. Ядра атомов этого тяжелого водорода, называемые *дейтонами*, состоят из двух частиц — протона и нейтрона. Этот изотоп водорода называется *дейтерием*. В природном водороде дейтерия содержится весьма незначительное количество. На каждые шесть тысяч атомов легкого водорода (массовое число равно единице) приходится только один атом дейтерия (тяжелого водорода).

За последние годы удалось получить искусственным путем еще один изотоп водорода — *сверхтяжелый водород*, получивший название *третий*. В ядрах атома этого изотопа водорода имеются три частицы: протон и два нейтрона, связанных друг с другом ядерными силами. Массовое число ядра атома третия равно трем, т. е. атом третия в три раза тяжелей атома легкого водорода.

Хотя атомы изотопов водорода и имеют различные массы, но все же они обладают одинаковыми химическими свойствами. Например, легкий водород, вступая в химическое взаимодействие с кислородом, образует с ним сложное вещество — воду. Аналогично этому изотоп водорода — дейтерий, соединяясь с кислородом, образует воду, которая в отличие от обычной воды называется *тяжелой водой*. Тяжелая вода находит большое

применение в процессе производства ядерной (атомной) энергии.

Следовательно, химические свойства атомов зависят не от массы их ядер, а от каких-то иных количественных характеристик. В дальнейшем мы увидим, что химические свойства атомов зависят только от строения электронной оболочки атома. Поскольку в атомах легкого водорода, дейтерия и трития имеется одинаковое количество электронов (по одному на каждый атом), эти изотопы имеют одинаковые химические свойства.

Химический элемент водород не случайно занимает первый номер в периодической системе элементов. Дело в том, что между номером любого элемента в периодической системе элементов и величиной заряда ядра атома этого элемента существует некоторая связь. Ее можно сформулировать так: **порядковый номер всякого химического элемента в периодической системе элементов численно равен положительному заряду ядра этого элемента, а следовательно, и числу вращающихся вокруг него электронов.**

Так как водород занимает первый номер в периодической системе элементов, то это значит, что положительный заряд ядра его атома равен единице и что вокруг ядра вращается один электрон.

Химический элемент гелий занимает второй номер в периодической системе элементов. Это значит, что он имеет положительный электрический заряд ядра, равный двум единицам, т. е. в составе его ядра должно быть два протона, а в электронной оболочке атома — два электрона. Природный гелий состоит из двух изотопов — тяжелого и легкого гелия. Массовое число тяжелого гелия равно четырем. Это значит, что в состав ядра атома тяжелого гелия, помимо вышеупомянутых двух протонов, должны входить еще два нейтрона. Что же касается легкого гелия, то его массовое число равно трем, т. е. в состав его ядра, помимо двух протонов, должен входить еще один нейтрон. Установлено, что в природном гелии число атомов легкого гелия составляет примерно одну миллионную долю атомов тяжелого гелия. На рис. 4 показана схематически модель атома гелия.

Дальнейшее усложнение строения атомов химических элементов идет за счет увеличения количества протонов и нейтронов в ядрах этих атомов и одновременно за счет увеличения количества электронов, вращающихся вокруг ядер (рис. 5).

Пользуясь периодической системой элементов, легко определить число электронов, протонов и ней-

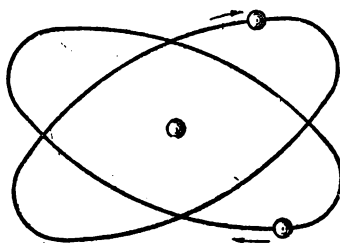


Рис. 4. Схема строения атома гелия

тронов, входящих в состав различных атомов. Как было упомянуто выше, порядковый номер химического элемента равен числу протонов, находящихся в ядре атома, и одновременно с этим числу электронов, вращающихся вокруг ядра. Что же касается атомного веса, то он приблизительно равен массовому числу атома, т. е. числу вместе взятых протонов и нейтронов в ядре. Следовательно, вычитая из атомного веса элемента число, равное порядковому номеру элемента, можно определить, какое количество нейтронов содержится в данном ядре:

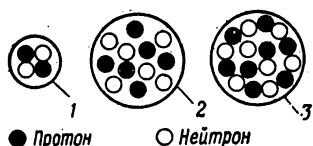


Рис. 5. Схемы строения ядер атомов:

1 — гелий; 2 — углерод; 3 — кислород

$$n = A - N,$$

где n — число нейтронов;
 N — порядковый номер элемента;
 A — атомный вес элемента.

Установлено, что ядра легких химических элементов, имеющих в своем составе поровну протонов и нейтронов, отличаются весьма большой прочностью, так как ядерные силы в них относительно велики. Например, ядро атома тяжелого гелия отличается исключительно большой прочностью, так как оно составлено из двух протонов и двух нейтронов, связанных друг с другом мощными ядерными силами.

Ядра атомов более тяжелых химических элементов содержат в своем составе уже неодинаковое количество протонов и нейтронов, поэтому их связь в ядре слабее, чем в ядрах легких химических элементов. Ядра этих элементов могут быть относительно легко расщеплены «при бомбардировке их атомными «снарядами» (нейтронами, ядрами атома гелия и т. д.). Что же касается наиболее тяжелых химических элементов, в частности радиоактивных, то их ядра отличаются настолько малой прочностью, что они самопроизвольно распадаются на составные части. К примеру, атомы радиоактивного элемента радия, состоящего из совокупности 88 протонов и 138 нейтронов, самопроизвольно распадаются, превращаясь в атомы радиоактивного элемента радона. Атомы же последнего в свою очередь распадаются на составные части, переходя в атомы других элементов.

Ознакомившись вкратце с составными частями ядер атомов химических элементов, рассмотрим строение электронных оболочек атомов.

Как известно, электроны могут вращаться вокруг ядер атомов только по строго определенным орбитам. При этом они так сгруппированы в электронной оболочке каждого атома, что можно различить отдельные слои электронов. В каждом слое может находиться количество электронов, не превышающее строго определенного числа. Так, например, в первом, ближайшем к ядру атома электронном слое может находиться макси-

мум два электрона, во втором — не более восьми электронов и т. д.

Те атомы, у которых внешние электронные слои целиком заполнены, имеют наиболее устойчивую электронную оболочку. Это значит, что данный атом прочно держит все свои электроны и не нуждается в получении извне добавочного количества их. Например, атом гелия имеет два электрона, целиком заполняющих первый электронный слой, а атом неона имеет десять электронов, из которых первые два целиком заполняют первый электронный слой, а остальные — второй (рис. 6). Следовательно, атомы гелия и неона имеют вполне устойчивые электронные оболочки, не стремятся их как-нибудь видоизменить количественно. Такие элементы химически инертны, т. е. не вступают в химическое взаимодействие с другими элементами.

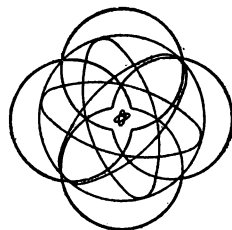


Рис. 6. Схема строения атома неона

Однако большинство химических элементов имеет такие атомы, в которых внешние электронные слои не целиком заполнены электронами. Например, атом калия имеет девятнадцать электронов, из которых восемнадцать целиком заполняют первые три слоя, а девятнадцатый электрон один находится в следующем, незаполненном электронном слое. Слабое заполнение электронами четвертого электронного слоя приводит к тому, что ядро атома весьма слабо удерживает самый внешний — девятнадцатый электрон, а поэтому последний может быть легко вырван из атома. Или, например, атом кислорода имеет восемь электронов, из которых два целиком заполняют первый слой, а остальные шесть размещены во втором слое. Таким образом, для полного завершения построения второго электронного слоя в атоме кислорода ему не хватает только двух электронов. Поэтому атом кислорода не только прочно удерживает свои шесть электронов во втором слое, но и обладает возможностью притянуть к себе два недостающих ему электрона для заполнения своего второго электронного слоя. Этого он достигает путем химического соединения с атомами таких элементов, у которых внешние электроны слабо связаны со своими ядрами.

Химические элементы, атомы которых не имеют целиком заполненных электронами внешних электронных слоев, как правило, химически активны, т. е. охотно вступают в химическое взаимодействие.

Итак, электроны в атомах химических элементов располагаются в строго определенном порядке и всякое изменение их пространственного расположения или количества в электрон-

ной оболочке атома приводит к изменению физико-химических свойств последнего.

Равенство числа электронов и протонов в системе атома является причиной того, что суммарный электрический заряд его равен нулю. Если равенство числа электронов и протонов в системе атома нарушается, то атом становится электрически заряженной системой.

Атом, в системе которого нарушено равновесие разноименных электрических зарядов вследствие того, что он потерял часть своих электронов или, наоборот, приобрел лишнее количество их, называется **ионом**.

Если атом теряет часть своих электронов, то он превращается в положительный ион, т. е. ион с положительным зарядом. При потере одного электрона атом превращается в однозарядный положительный ион; если он теряет два электрона, то превращается в двухзарядный положительный, и т. д. Например, атом водорода, потеряв свой единственный электрон, превращается в однозарядный положительный ион водорода H^+ ; атом цинка, потерявший два электрона, превращается в двухзарядный положительный ион цинка Zn^{++} и т. д.

Наоборот, если атом приобретает некоторое лишнее количество электронов, то он становится отрицательным ионом. Например, атом хлора, получивший один лишний электрон, превращается в однозарядный отрицательный ион хлора Cl^- ; атом кислорода, получивший лишние два электрона, превращается в двухзарядный отрицательный ион кислорода O^{--} и т. д.

Атом, превратившийся в ион, становится по отношению к внешней среде электрически заряженной системой. А это значит, что атом стал обладать электрическим полем, вместе с которым он составляет единую материальную систему и через это поле осуществляет электрическое взаимодействие с другими электрически заряженными частицами вещества — ионами, электронами, положительно заряженными ядрами атомов и т. д.

Способность разноименных ионов взаимно притягиваться друг к другу является причиной того, что они химически соединяются, образуя более сложные частицы вещества — **молекулы**.

В заключение следует отметить, что размеры атома очень велики по сравнению с размерами тех веществных частиц, из которых они состоят. Ядро самого сложного атома вместе со всеми электронами занимает миллиардную долю объема атома. Простой подсчет показывает, что если бы удалось один кубический метр платины сжать так крепко, чтобы исчезли внутриатомные и междуатомные пространства, то получился бы объем, равный примерно одному кубическому миллиметру.

§ 6. ЭНЕРГИЯ АТОМНОГО ЯДРА

Согласно закону взаимосвязи массы и энергии между массой и энергией любого материального тела существует строго определенная зависимость, выражаемая формулой

$$W = mc^2, \quad (2)$$

где W — энергия материального тела в эргах;
 m — масса материального тела в граммах;
 $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/сек. — скорость света в сантиметрах в секунду.

Следовательно, всякое выделение энергии материальным телом связано с уменьшением массы этого тела и, наоборот, всякое поглощение энергии материальным телом связано с увеличением его массы. Напомним, что изменение массы материального тела при выделении им энергии нельзя рассматривать как явление перехода массы тела (вещества) в энергию. При всякого рода излучениях энергии сохраняется как общее количество массы, так и общее количество энергии. Например, излучение (свет), появившееся в результате преобразования массы вещества, обладает массой, равной массе вещества, израсходованного на его образование.

Рассмотрим несколько примеров, иллюстрирующих взаимосвязь массы и энергии.

Как известно, в результате многих химических реакций, например горения (соединения тел с кислородом), выделяется некоторое количество тепловой энергии (тепла). А если это так, то при горении тел должна уменьшаться масса вещества соответственно выделяемой тепловой энергии. Например, при полном сгорании 12 г углерода расходуется 32 г кислорода. Казалось бы, что в результате этой химической реакции должно было бы получиться 44 г углекислого газа. Однако в действительности его получается несколько меньше.

Дело в том, что при полном сгорании 12 г углерода выделилось 96 больших калорий тепла и в соответствии с этим уменьшилась масса веществ, принимавших участие в химической реакции (горении углерода). Подсчитаем, на какую же величину Δm изменилась масса веществ (углерода и кислорода) при сгорании 12 г углерода.

Из формулы (2) следует, что

$$\Delta m = \frac{W}{c^2}, \quad (3)$$

где Δm — уменьшение величины массы в граммах;

$W = 96$ больших калорий $= 4 \cdot 10^{12}$ эрг, так как 1 большая калория $= 4,18 \cdot 10^{10}$ эрг.

Следовательно,

$$\Delta m = \frac{4 \cdot 10^{12}}{(3 \cdot 10^{10})^2} = 4,4 \cdot 10^{-9} \text{ грамма,}$$

т. е. в результате выделения 96 больших калорий тепла при полном сгорании 12 г углерода общая масса веществ (углерода и кислорода) уменьшилась на 4,4 миллиардных доли грамма. Значит, при данной химической реакции выделилось не 44 г углекислоты, а на 4,4 миллиардных доли грамма меньше. Надо признать, что убыль массы в данном случае оказалась настолько малой, что ею практически можно было бы пренебречь. Вообще говоря, убыль массы вещества при разного рода химических реакциях относительно мала и энергия, выделяемая при этом, также относительно невелика.

Иная картина наблюдается при так называемых ядерных реакциях, происходящих в ядрах атомов химических элементов. Ядерная реакция — это такой физический процесс, в результате которого ядра одних атомов превращаются в ядра других, качественно иных атомов. Ядерное вещество, принимающее участие в этих реакциях, например при взрыве атомной бомбы, теряет уже практически ощутимую величину массы, измеряемую граммами. В соответствии с этим выделяется весьма большое количество ядерной (атомной) энергии. Если, например, при атомном взрыве масса «ядерного горючего вещества» преобразовалась в массу иного вида материи, равную 10 г, то величина энергии, выделившейся при этом, равна

$$W = mc^2 = 10 (3 \cdot 10^{10})^2 = 9 \cdot 10^{21} \text{ эрг} = \\ = 216 \cdot 10^9 \text{ больших калорий.}$$

Примечание. 1 эрг = $0,24 \cdot 10^{-10}$ больших калорий.

Следовательно, в результате преобразования 10 г массы «ядерного горючего вещества» выделилось количество энергии, эквивалентное двести шестнадцати миллиардам больших калорий. Для выделения такого количества тепла необходимо было бы затратить примерно 30 000 тонн высокосортного каменного угля.

Интересно отметить, что солнце в результате выделения огромнейшего количества энергии ежегодно теряет массу, равную 1200 миллионам тонн. Энергия, излучаемая солнцем, получается на нем в результате разного рода ядерных преобразований.

Установлено, что выделение энергии атомных ядер можно осуществить двояким образом. В одном случае ее можно получить в результате расщепления сложных атомных ядер на более простые, например расщепления ядер урана или плутония. В другом случае, наоборот, ее получают в результате образования сложных ядер атомов за счет воссоединения более простых, например образования ядер атомов гелия за счет воссоединения ядер атомов тяжелого и сверхтяжелого водорода.

Рассмотрим реакцию расщепления ядер атомов урана, положенную в основу действия атомной бомбы.

Природный уран содержит в своем составе три изотопа, из которых один имеет атомный вес 238, другой — 235 и третий — 234. Основным изотопом природного урана является наиболее тяжелый изотоп — уран 238, составляющий примерно 99,3% всего количества природного урана. Изотопа урана 235 содержится в природном уране 0,7% и, наконец, изотопа урана 234 — 0,006%. Доля изотопа урана 234 в природном уране настолько мала, что им практически можно пренебречь.

Ядро урана 238 отличается большей прочностью по сравнению с ядром урана 235. Чтобы расщепить ядро урана 238, необходимо бомбардировать его быстрым нейтроном, летящим со скоростью 10—15 тысяч километров в секунду. Если же на ядро урана 238 воздействовать медленным нейтроном, скорость движения которого измеряется десятками километров в секунду, то оно не расщепится, а просто поглотит этот нейтрон. В результате этого он превратится в ядро нептуния, а затем плутония, занимающих соответственно номера 93 и 94 в периодической таблице элементов, т. е. по соседству с ураном, занимающим номер 92.

Наоборот, ядра атомов урана 235 малоустойчивы. На них достаточно воздействовать медленными нейтронами, чтобы их можно было расщепить. Но, как известно, в природном уране изотоп урана 235 содержится в очень малом количестве, а поэтому для осуществления бурной ядерной реакции в уране необходимо иметь уран 235 в чистом виде и в достаточном количестве.

Ядерная реакция в уране 235 происходит следующим образом. Допустим, что какой-нибудь блуждающий нейтрон проник в одно из ядер атомов урана 235. Под действием этого нейтрона ядро атома расщепляется на два осколка (барий 56 и криптон 36 или лантан 57 и бром 35), разлетающихся в разные стороны с громадными скоростями. Одновременно с этим из распавшегося ядра атома урана 235 вылетают три быстрых нейтрона (вторичные нейтроны), каждый из которых бомбардирует встретившееся ему на пути ядро атома. В результате происходит расщепление трех новых ядер атомов урана 235, которые выделяют все вместе уже девять новых быстрых нейтронов. Последние же бомбардируют девять новых ядер атомов, после расщепления которых выделяется двадцать семь быстрых нейтронов. Они бомбардируют двадцать семь ядер атомов, расщепляют их, при этом выделяется восемьдесят один нейтрон и т. д. Эта так называемая цепная реакция расщепления ядер атомов урана 235 (рис. 7) протекает весьма быстро, в форме атомного взрыва, и при этом выделяется громаднейшее количество ядерной (атомной) энергии.

Сила атомного взрыва, при котором был израсходован 1 кг «ядерного горючего вещества», эквивалентна силе взрыва шестнадцати миллионов килограммов сильного взрывчатого вещества.

Значительно больший эффект выделения ядерной энергии дают так называемые термоядерные реакции. К ним относятся ядерные реакции образования более тяжелых ядер из совокупности легких при температурах, измеряемых миллионами градусов. Энергия, выделяемая при термоядерных реакциях,

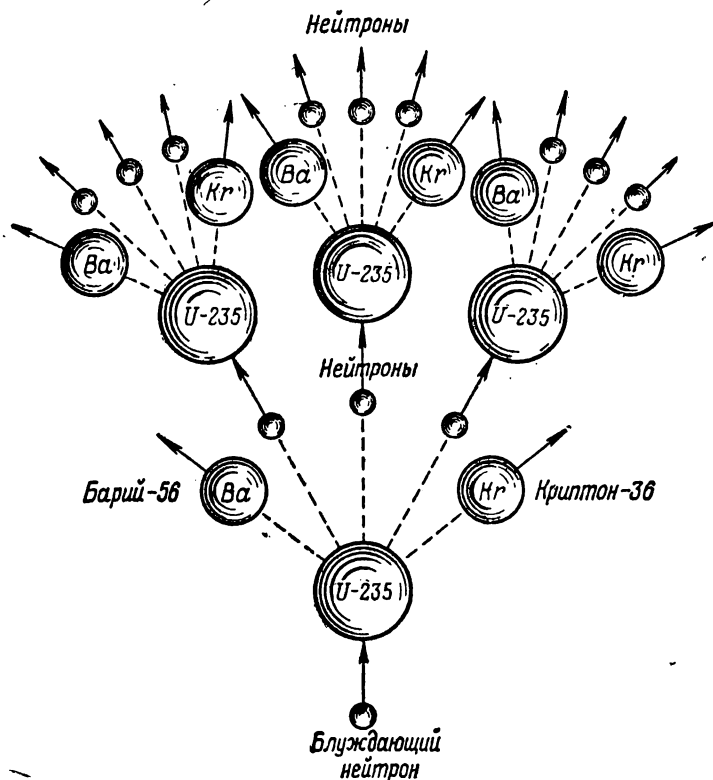


Рис. 7. Схематическое изображение цепной реакции расщепления ядер атомов урана 235

во много раз превышает энергию, получаемую при ядерных реакциях расщепления тяжелых ядер. Примером такой термоядерной реакции может служить образование ядер атомов тяжелого гелия из совокупности ядер тяжелого водорода (дейтерия) и ядер сверхтяжелого водорода (трития). Ядро дейтерия состоит из одного протона и одного нейтрона, а ядро трития — из одного протона и двух нейтронов. При весьма высокой температуре (в несколько миллионов градусов), которую практически получают при атомном взрыве, ядра дейтерия соединяются с ядрами трития и при этом образуются ядра тяжелого гелия, состоящего из совокупности двух нейтронов и двух протонов. Что же ка-

сается одного лишнего нейтрона, то он с громадной скоростью выделяется в окружающее пространство.

Ядерная (атомная) энергия может быть использована и для промышленных целей. В данном случае в качестве исходного материала используется уран 238.

Ядра урана 238, как было сказано выше, не расщепляются в результате бомбардировки их медленными нейтронами. В этом случае дело ограничивается тем, что ядра поглощают медленные нейтроны и превращаются в ядра соседнего элемента — нептуния, а последние в свою очередь превращаются в ядра следующего соседнего элемента — плутония.

Получившийся в результате ядерной реакции плутоний является радиоактивным веществом. Выбрасывая из себя альфа-частицу (ядро атома тяжелого гелия), ядро атома плутония превращается в ядро изотопа урана 235, являющегося, как известно, весьма активным «ядерным горючим».

Ядра плутония — весьма ценное «ядерное горючее». Во-первых, ядро плутония может быть легко расщеплено медленными нейтронами и, во-вторых, отличаясь значительно по своим химическим свойствам от урана, оно может быть легко отделено от последнего с помощью обычных химических реакций, в то время как отделение изотопа урана 235 от изотопов урана 238 затруднительно и требует относительно большой затраты энергии.

Устройство, с помощью которого получается радиоактивный плутоний за счет ядерной реакции урана 238, называется атомным реактором (котлом).

В атомный реактор закладывается природный уран, состоящий из изотопов — урана 238 и урана 235. Под действием медленных нейтронов ядра урана 235 расщепляются, превращаясь в ядра-осколки более легких химических элементов. При этом из каждого ядра урана 235 вылетают по три быстрых нейтрона. На своем пути они встречают специально введенные в атомный реактор вещества, называемые замедлителями, например графит (рис. 8). Назначение замедлителей — отбирать у быстрых нейтронов часть их кинетической энергии и превращать их в медленные нейтроны. Это необходимо для того, чтобы быстрые нейтроны, выбрасываемые расщеп-

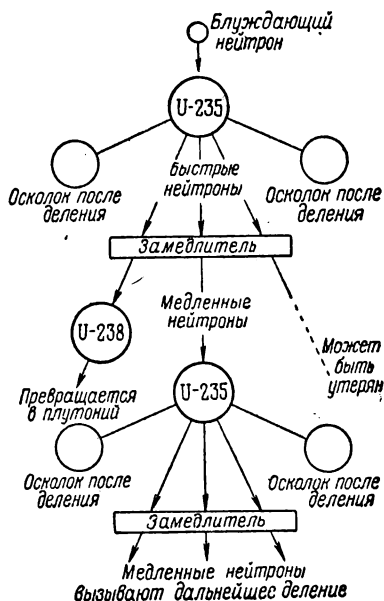


Рис. 8. Ядерная реакция в уране с замедлителем

ленными ядрами урана 235, не смогли расщепить ядра атомов урана 238. Одна часть замедленных нейтронов продолжает расщеплять ядра атомов урана 235, так что цепная реакция происходит непрерывно в атомном реакторе. Но она протекает не бурно, не сопровождается взрывом, а идет медленно, так как ядер атомов урана 235 содержится гораздо меньше, чем ядер атомов урана 238. Другая и более значительная часть замедленных нейтронов поглощается ядрами атомов урана 238, что в конечном итоге приводит к превращению их в ядра атомов плутония.

Таким образом, характерной особенностью работы атомного реактора является то, что в нем одновременно с расходом «ядерного горючего» — урана 235 вырабатывается и накапливается не менее ценное «ядерное горючее» — плутоний. Если в атомном реакторе за год расходуется одна тонна «ядерного горючего» — урана 235, то одновременно с этим за счет урана 238 получается тонна нового «ядерного горючего» — плутония. Используя эту тонну плутония в атомном реакторе в качестве «ядерного горючего», можно через год получить новую тонну плутония за счет расхода урана 238 и т. д. Следовательно, основным расходным материалом атомного реактора является уран 238, который, как известно, составляет 99,3% всего количества природного урана.

Чем больше медленных нейтронов имеется в атомном реакторе, тем быстрее протекает в нем ядерная реакция и, наоборот, чем меньше их там, тем менее интенсивной становится она. В целях регулирования скорости ядерной реакции в атомном реакторе в последний вводятся специальные поглотители медленных нейтронов, например кадмий. При увеличении количества кадмия в атомном реакторе ядерная реакция урана становится все более и более замедленной и может быть вообще прекращена.

Чтобы медленные нейтроны не улетучивались из атомного реактора, последний, как правило, облицовывается специальной оболочкой, отражающей нейтроны внутрь реактора.

Работа с атомным реактором требует большой осторожности, так как при ядерных реакциях происходит интенсивное радиоизлучение в виде потока гамма-лучей, нейтронов и т. д., что может угрожать жизни и здоровью обслуживающего персонала. Для предупреждения этого атомные реакторы обычно изолируют от внешнего пространства рядом веществ (например, кадмий, свинец и некоторые другие), сильно поглощающих радиоактивное излучение. И в довершение всего атомный реактор покрывается извне слоем бетонной оболочки толщиной в несколько метров.

При работе атомного реактора выделяется большое количество тепловой энергии, которая может быть целесообразно использована в промышленных целях.

На рис. 9 показано схематически устройство атомного реактора, предназначенного для обслуживания электрической станции. Здесь мы видим: урановые стержни, являющиеся «ядерным горючим»; графит, играющий роль замедлителя ядерной реакции; отражатель, имеющий назначение удерживать нейтроны в атомном реакторе, и защитную бетонную оболочку толщиной в несколько метров, предохраняющую от проникновения из атомного реактора во внешнюю среду нейтронов и гамма-лучей. Вода или какой-либо жидкий металл, например калий, натрий,

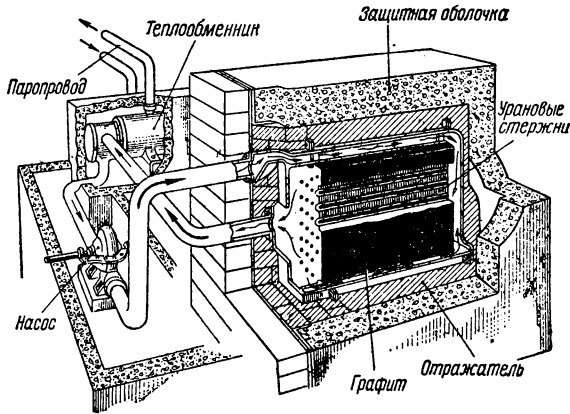


Рис. 9. Схема устройства атомного реактора с замедлителем из графита

свинец, прогоняются насосом из атомного реактора в теплообменник, где они отдают свое тепло воде, циркулирующей в змеевике теплообменника, а затем возвращаются обратно в атомный реактор. Вода же, нагретая в змеевике теплообменника, превращается в пар высокой температуры и давления и по паропроводу направляется в паровую турбину, приводящую во вращение генератор электрической энергии.

Преимущества атомной электростанции по сравнению с обычной теплоэлектростанцией очень велики. Например, если атомная электростанция израсходует в год две тонны ядерного горючего, то она даст энергии более десяти миллиардов киловатт-часов, т. е. больше, чем даст строящаяся ныне самая мощная в мире Сталинградская гидроэлектростанция. Для получения такого количества энергии от обычной тепловой электростанции потребовалось бы сжечь много миллионов тонн высококачественного каменного угля.

§ 7. МОЛЕКУЛЫ И ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕЛА

Атомы, соединяясь друг с другом, образуют более сложные по своему строению частицы вещества, называемые молекулами.

Молекулой называют наименьшее количество сложного вещества, сохраняющее индивидуальные химические свойства этого вещества.

Способность различных атомов присоединять к себе различное количество других атомов носит название **валентности**.

За единицу валентности атома принимается способность атома присоединять к себе только один атом водорода или замещать его в каком-либо сложном веществе.

Например, атомы хлора, натрия, водорода одновалентны, кислорода и серы — двухвалентны, азота и фосфора — трехвалентны, углерода и кремния — четырехвалентны и т. д.

При образовании молекулы сложного вещества атомы обычно соединяются так, что на каждую единицу валентности одного атома приходится одна единица валентности другого атома. Например, атом кислорода O двухвалентен, а атом водорода H одновалентен. Следовательно, для того чтобы полностью исчерпать свою двухвалентность, атом кислорода должен вступать в химическое взаимодействие с двумя одновалентными атомами водорода. В результате этого соединения образуется молекула воды H_2O .

Молекулы весьма малы по размерам, а поэтому для образования физических тел требуется колоссально большое число молекул. Например, для образования капли воды требуется примерно 1500 миллиардов миллиардов молекул ($15 \cdot 10^{20}$ молекул).

Способность атомов вступать в химическое взаимодействие и образовывать физические тела обусловлена строением их электронных оболочек и, в частности, количеством электронов, содержащихся во внешнем электронном слое атома.

Существуют различные виды связи атомов друг с другом, в результате которых из совокупности их создаются молекулы и физические тела. Вначале ознакомимся с так называемой ионной (полярной) связью атомов, рассмотрев в качестве примера образование кристаллов хлористого натрия (поваренной соли) $NaCl$ из совокупности положительных ионов натрия Na^+ и отрицательных ионов хлора Cl^- .

Атом хлора имеет в своей электронной оболочке 17 электронов, из которых во внешнем (третьем) электрическом слое находится семь электронов. Поэтому атом хлора стремится отобрать от атомов других химических элементов недостающий ему восьмой электрон для сформирования устойчивого восьмизлектронного внешнего слоя.

Атом натрия имеет в своей электронной оболочке 11 электронов, из которых во внешнем (третьем) электронном слое находится всего один электрон. Поэтому внешний электронный слой (третий слой) в атоме натрия весьма неустойчив. Единственный электрон этого слоя слабо притягивается ядром атома,

а потому относительно легко может покинуть пределы данного атома.

Естественно, что атом хлора при соприкосновении с атомом натрия не замедлит отобрать у него внешний электрон (электрон третьего слоя), и в результате этого он превратится в однократно отрицательный ион хлора. Что же касается атома натрия, то он, потеряв свой внешний электрон, превращается в положительно заряженный ион натрия. Вновь образовавшиеся отрицательный ион хлора и положительный ион натрия, будучи разноименно заряженными электрическими частицами, притягиваются друг к другу. В результате этого образуется так называемая кристаллическая решетка поваренной соли (рис. 10). Здесь каждый положительный ион натрия (темные шарики) окружен симметрично со всех сторон шестью отрицательными ионами хлора (светлые шарики) и, наоборот, каждый ион хлора симметрично окружен шестью ионами натрия.

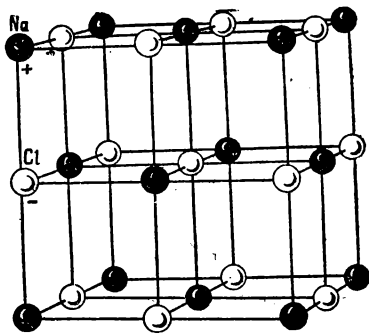


Рис. 10. Кристаллическая решетка поваренной соли

симметрично со всех сторон шестью отрицательными ионами хлора (светлые шарики) и, наоборот, каждый ион хлора симметрично окружен шестью ионами натрия. Надо сказать, что в кристалле поваренной соли все десять электронов положительного иона натрия вращаются вокруг его ядра и не покидают пределов иона. В отрицательном ионе хлора все восемнадцать электронов также вращаются вокруг ядра и не покидают пределов этого иона. Даже электрон, отобранный атомом хлора от атома натрия, прочно удерживается ионом хлора в своей системе. Следовательно, в кристаллах поваренной соли практически нет таких электронов, которые перемещались бы в междоионном пространстве и переходили бы от одного иона к другому. Это положение весьма характерно для всех кристаллических веществ, образованных в результате ионной связи, т. е. взаимного притяжения разноименных ионов. Отличительной особенностью тел подобного рода является то, что они хрупки, как поваренная соль, не ковки, более или менее прозрачны, плохо проводят тепло и почти не проводят электричества.

Другой вид связи, с помощью которой образуются более сложные частицы вещества, — это так называемая **гомополярная связь**. При ней для образования молекулы объединяются однородные атомы, например два атома водорода, два атома кислорода и т. д. Так как в этом случае объединяются два однородных атома, то невозможно, чтобы один из них стал положительным ионом, а другой — отрицательным путем перехода электронов из одного атома в другой. Здесь связь атомов осуществляется несколько иначе. Оба однородных атома **выде-**

ляют по одному внешнему электрону и при этом становятся положительными ионами. Что же касается выделенных атомами электронов, то они располагаются в междуионном пространстве как бы посредине между двумя положительными ионами и своим электрическим взаимодействием стягивают их в единую систему — молекулу. Например, два атома кислорода O выделяют из своего состава по одному электрону, в результате чего положительные ионы атомов кислорода, связанные этими двумя общими электронами, образуют молекулу кислорода O_2 .

Третий вид связи — это металлическая связь, при которой из совокупности ионов металла и электронов образуется кристаллическая решетка металлов. В этом случае атомы металлов соединяются друг с другом в результате электрического взаимодействия положительных ионов и электронов. При образовании металлического кристалла каждый атом металла в зависимости от его валентности отдает один — два электрона «в общее пользование» всех частиц металла, превращаясь в положительный ион. Поэтому кристаллическая решетка металла содержит только положительные ионы, размещенные в ней строго симметрично в определенном порядке. Выделенные же атомами металла электроны свободно перемещаются в междуионном пространстве, образуя нечто вроде электронного газа. Эти «общественные» электроны и являются тем «цементирующим веществом», с помощью которого ионы металла образуют монолитную крепкую кристаллическую решетку.

«Обобщественные» электроны, перемещающиеся в междуионном пространстве кристаллов металла, называются свободными электронами. Они названы так потому, что каждый из них не привязан к какому-нибудь определенному иону металла, а принадлежит всем ионам, а поэтому может свободно перемещаться в междуионном пространстве.

Физические тела, возникшие в результате металлической связи, являются металлами. Характерная особенность их — ковкость, непрозрачность, хорошая проводимость тепла и электричества.

В заключение следует отметить, что нельзя резко разграничивать тела по видам их атомной связи. В некоторых физических телах могут одновременно проявляться различные виды связи, например ионная и металлическая. В силу этого многие вещества наряду с металлическими свойствами могут обладать в той или иной степени свойствами неметаллических веществ (например, некоторые сплавы металлов).

§ 8. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ ПЕРВОГО РОДА

В предыдущем параграфе было выяснено, что кристаллическая решетка металла состоит из совокупности положительных ионов, между которыми по всевозможным направлениям переме-

щаются свободные электроны, осуществляющие металлическую связь ионов. Силы взаимного притяжения положительных ионов металла и свободных электронов не только преодолевают взаимное отталкивание положительных ионов металла, но и связывают их в прочную систему — кристаллическую решетку.

Количество свободных электронов в металлах чрезвычайно велико. Если, например, каждый атом серебра в силу его одновалентности выделяет для общего пользования один свободный электрон, то это значит, что число свободных электронов, содержащихся в одном кубическом сантиметре серебра, равно примерно шестьдесят тысячам миллиардов миллиардов ($6 \cdot 10^{22}$) электронов.

Движение свободных электронов в междуионном пространстве металла можно уподобить тепловому движению молекул газа. Поэтому всю совокупность свободных электронов металла иногда называют «электронным газом», а движение электронов в нем называют хаотическим, или беспорядочным. Однако движение свободных электронов в междуионном пространстве металлов подчинено особым законам, согласно которым каждый свободный электрон занимает в любой данный момент времени строго определенное энергетическое состояние, которое уже не может занимать в этот же момент другой свободный электрон.

Общее расположение всех свободных электронов в металле в нормальных условиях таково, что образуется система с наименьшей энергией электронов, при этом их заряды полностью компенсируют заряды положительных ионов металла по отношению к внешней среде. Это значит, что в нормальных условиях металл электрически нейтрален. Следовательно, для того чтобы зарядить металл электричеством, надо как-то изъять из него часть свободных электронов. Тогда равновесие электрических зарядов ионов металла и отрицательных зарядов свободных электронов будет нарушено и металл в целом по отношению к внешней среде зарядится положительным электричеством.

Если в металлическом теле, например в медной проволоке, электрического поля нет, то свободные электроны перемещаются хаотически (беспорядочно) в самых разнообразных направлениях (рис. 11). При этом сколько свободных электронов движется в направлении оси проволоки справа налево, столько же в данный момент времени их движется слева направо. Следовательно, направленного движения потока электронов в проволоке в данном случае не наблюдается.

Теперь допустим, что в медной проволоке возникло электрическое поле. Свободные электроны, очутившись в нем, начинают испытывать на себе действие сил этого поля. Те свободные электроны, направление движения которых совпадает с направлением действия сил поля, получают некоторую добавоч-

ную скорость, а электроны, движение которых совершается навстречу действию сил поля, замедляют скорость своего движения, некоторая часть их даже изменяет направление движения на противоположное. Короче говоря, движение каждого свободного электрона металлической проволоки, находящейся в электрическом поле, представляет собой совокупность двух его движений: беспорядочного (теплого) и направленного, совпадающего с направлением действия сил электрического поля.

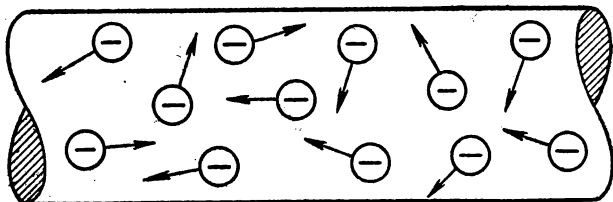


Рис. 11. Беспорядочное движение свободных электронов в металле

Направленное движение потока свободных электронов вдоль металлической проволоки можно уподобить движению роя насекомых, когда он поступательно движется вперед и в то же время внутри самого роя каждое отдельное насекомое движется беспорядочно с некоторой относительно большой скоростью.

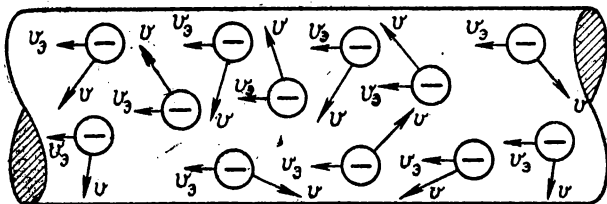


Рис. 12. Свободные электроны металла в электрическом поле движутся направленно со скоростью v .

Направленное (упорядоченное) движение потока свободных электронов внутри металлического проводника называется электрическим током проводимости.

На рис. 12 схематически изображена картина электрического тока проводимости. Здесь показано, что скорость движения электронов имеет две составляющие: одна из них, v_0 , обуславливает направленное движение всего потока электронов, т. е. ток проводимости, а другая, v , различная для каждого отдельного электрона, обуславливает его тепловое движение.

Следовательно, свободные электроны металла являются теми вещественными элементарными частицами, благодаря которым в металлах возникает электрический ток проводимости.

Если скорость беспорядочного движения свободных электронов в металлах в среднем измеряется тысячами километров в секунду, то скорость направленного движения потока свободных электронов при электрическом токе проводимости не превышает долей сантиметра в секунду.

Силы электрического поля, перемещая свободные электроны вдоль металлической проволоки, совершают некоторую работу. Эта работа идет на повышение энергии свободных электронов, которые в свою очередь отдают ее ионам металла в виде тепловой энергии.

Физические тела, обладающие свободными электронами и в соответствии с этим электронной проводимостью, называются электрическими проводниками первого рода. К ним относятся металлы и сплавы металлов. Проводники первого рода играют исключительно большую роль в электротехнике.

К числу металлов, широко применяемых в электротехнике для изготовления проводников, относятся медь, алюминий и сталь,

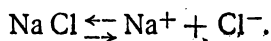
§ 9. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ ВТОРОГО РОДА

Большая часть жидких веществ состоит в основном из совокупности электрически нейтральных молекул, так что практически в них очень мало свободных электронов или каких-либо иных электрически заряженных вещественных частиц. Поэтому такие жидкие вещества весьма плохо проводят электричество. К подобного рода жидкостям относятся химически чистая вода, керосин, минеральные масла, водные растворы сахара, глицерина и т. д.

Однако наряду с жидкостями, плохо проводящими электричество, имеются и такие, которые обладают большой электропроводимостью. К ним относятся водные растворы солей, кислот, щелочей, например раствор серной кислоты H_2SO_4 , медного купороса $CuSO_4$, едкого натра $NaOH$ и т. д. Такого рода электропроводящие жидкие вещества называют электролитами или проводниками второго рода.

Опытом установлено, что во всяком электролите происходит непрерывный процесс диссоциации молекул, т. е. распада их на составные части — разноименные ионы. Например, в водном растворе хлористого натрия $NaCl$ молекула распадается на две самостоятельные части: положительный однозарядный ион натрия Na^+ и отрицательный однозарядный ион хлора Cl^- .

Диссоциацию молекулы поваренной соли $NaCl$ можно записать следующей формулой;



Процесс диссоциации молекул в растворах солей и кислот протекает очень интенсивно, так что в каждом кубическом сантиметре раствора содержится громадное количество ионов обоих знаков; эти ионы принимают участие в тепловом движении молекул, беспорядочно перемещаясь в растворе.

Одновременно с явлением диссоциации молекул в электролитах происходит и обратный процесс — **молизация молекул**, т. е. процесс образования нейтральных молекул в результате воссоединения разноименных ионов.

Таким образом, в нормальных условиях в электролитах происходит непрерывный процесс диссоциации и молизации молекул. При этом электролит в целом электрически нейтрален, так как в нем разноименные ионы в каждый данный момент размещены так, что электрически взаимно нейтрализуются.

Степень диссоциации молекул растворенного вещества зависит от его природы и от концентрации раствора. В слабых растворах солей и кислот практически все молекулы диссоциированы. Количество ионов в каждом кубическом сантиметре электролита измеряется миллиардами миллиардов ионов. Даже в чистой воде H_2O , которая считается слабо диссоциированной, на один кубический сантиметр приходится около шести миллиардов положительных ионов водорода H^+ и столько же отрицательных однозарядных ионов гидроксила OH^- .

Установлено, что при диссоциации молекул электролитов металлы и водород всякий раз выделяются из молекул в виде положительных ионов, а остальная часть молекулы образует отрицательный ион.

Если воздействовать на ионы электролита силами электрического поля, то положительные ионы приобретают добавочную скорость в направлении поля, а отрицательные — в противоположном направлении. В результате этого, помимо беспорядочного теплового движения ионов, в электролите будет наблюдаться направленное, упорядоченное движение двух потоков разноименных ионов в прямо противоположных направлениях (рис. 13).

Упорядоченное и направленное движение потока ионов в электролите, происходящее под влиянием сил электрического поля, называется **ионным электрическим током**.

Следовательно, основное отли-

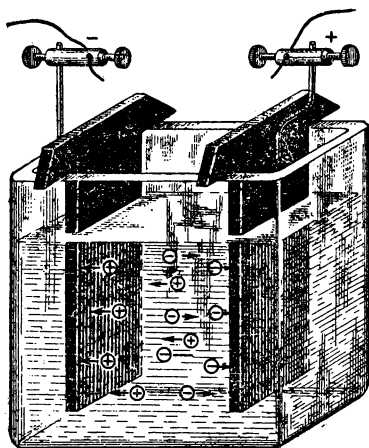


Рис. 13. Схематическое изображение ионного тока в электролите

чие ионного электрического тока от тока проводимости заключается в том, что ток проводимости создается движением свободных электронов, а ионный электрический ток — движением ионов, т. е. зарядов, размещенных на частицах распавшихся молекул.

Скорость направленного движения потоков разноименных ионов в электролитах весьма мала — в среднем она измеряется долями сантиметра в секунду.

Проводники второго рода (электролиты) играют важную роль в электротехнике, например при работе химических источников электрической энергии (аккумуляторов и гальванических элементов), при электролизе и в ряде иных случаев.

* К числу электролитов, широко применяемых в электротехнике, относятся: водный раствор серной кислоты H_2SO_4 для кислотных аккумуляторов, водный раствор едкого кали KOH для щелочных аккумуляторов, водный раствор едкого натра $NaOH$ для щелочных аккумуляторов, водный раствор хлористого аммония (нашатыря) NH_4Cl для гальванических элементов марганцевой системы.

§ 10. ПОЛУПРОВОДНИКИ

Наряду с проводниками электричества в природе существует много веществ, обладающих значительно меньшей электропроводимостью, чем металлические проводники. Вещества подобного рода называются **полупроводниками**.

К полупроводникам относятся: некоторые химические элементы, например селен Se , кремний Si и германий Ge ; сернистые соединения, например сернистый галлий TlS , сернистый кадмий CdS , сернистое серебро Ag_2S ; карбиды, например карборунд SiC , и ряд других веществ.

Природа электрической проводимости полупроводника зависит от рода примесей, имеющих в основном материале полупроводника, и от технологий изготовления его составных частей.

Различают две основные разновидности электрической проводимости полупроводников — электронную и «дырочную».

Полупроводник обладает электронной проводимостью, если в атомах его примеси внешние электроны относительно слабо связаны с ядрами этих атомов. Если в подобного рода полупроводнике создать электрическое поле, то под влиянием сил этого поля внешние электроны атомов примеси полупроводника покинут пределы своих атомов и превратятся в свободные электроны. Свободные электроны создадут в полупроводнике электрический ток проводимости под влиянием сил электрического поля. Следовательно, природа электрического тока в полупроводниках с электронной проводимостью та же, что и в металлических проводниках. Но так как свободных электронов в единице объема полупроводника во много раз меньше, чем в единице объема металлического провод-

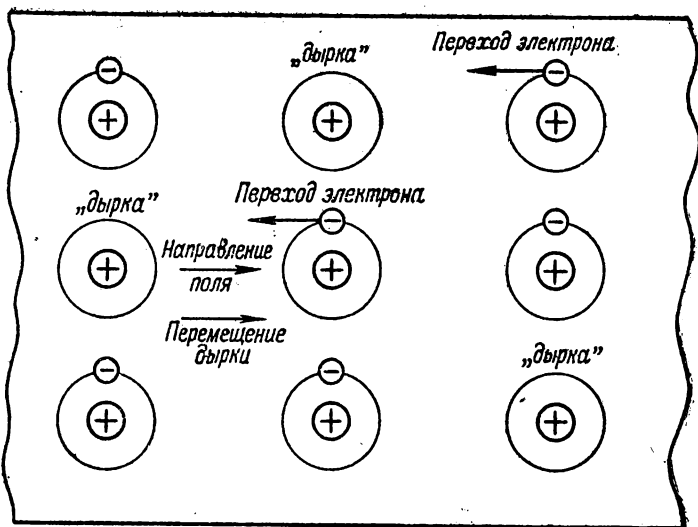


Рис. 14. Схематическое изображение тока в полупроводнике с «дырочной» проводимостью

ника, то естественно, что при всех прочих одинаковых условиях ток в полупроводнике будет во много раз меньше, чем в металлическом проводнике.

Полупроводник обладает «дырочной» проводимостью, если атомы его примеси не только не отдают своих внешних электронов, но, наоборот, стремятся захватить электроны атомов основного вещества полупроводника.

Если атом примеси отберет электрон у атома основного вещества, то в последнем образуется нечто вроде свободного места для электрона — «дырка». Атом полупроводника, потерявший электрон, называют «электронной дыркой», или просто «дыркой». Если «дырка» заполняется электроном, перешедшим с соседнего атома, то она ликвидируется и атом становится нейтральным в электрическом отношении, а «дырка» смещается на соседний атом, потерявший электрон. Следовательно, если на полупроводник, обладающий «дырочной» проводимостью, воздействовать электрическим полем, то «электронные дырки» будут смещаться в направлении этого поля.

На рис. 14 показана схематически картина электрического тока в полупроводнике с «дырочной» проводимостью. Здесь мы видим, что электрическое поле направлено слева направо вдоль полупроводника. Переход электронов с одного атома на другой происходит навстречу электрическому полю, а «электронные дырки» смещаются в направлении поля. Смещение «электронных дырок» в направлении действия электрического поля аналогично перемещению положительных электрических зарядов в поле

и, следовательно, представляет собой явление электрического тока в полупроводнике.

Полупроводники нельзя строго разграничивать по механизму их электрической проводимости, так как наряду с «дырочной» проводимостью данный полупроводник может в той или иной степени обладать и электронной проводимостью.

В современной технике полупроводники нашли самое широкое применение. Ниже приведено несколько примеров практического использования полупроводников в современной технике.

Полупроводниковые фотоэлементы. Фотоэлементом называется прибор, дающий возможность непосредственно преобразовывать лучистую (световую) энергию в электрическую.

На рис. 15. схематически показано устройство полупроводникового вентильного фотоэлемента. Он состоит из металлической пластинки 1, на которую нанесен слой полупроводника 2, а на последний в свою очередь нанесен тончайший полупрозрачный слой серебра или золота 4.

Слой полупроводника 2, например кремния, предварительно подвергается специальной обработке, в результате которой на одной стороне его, примыкающей к металлической пластинке 1, образуется слой, обладающий «дырочной» проводимостью, а на противоположной стороне, примыкающей к полупрозрачному слою металла 4, — слой, обладающий электронной проводимостью. Так как полупроводник 2 имеет в разных своих слоях различную по природе проводимость (электронную и «дырочную»), то на границе этих слоев образуется так называемый запирающий слой 3. Последний обладает вентильным свойством, т. е. способностью пропускать электроны только в одном направлении — от слоя полупроводника с электронной проводимостью к слою с «дырочной» проводимостью. В обратном же направлении электроны через запирающий слой проникнуть не могут.

Если на металлический полупрозрачный слой 4 падают лучи света, то фотоны света частично отражаются от него, частично поглощаются им, а некоторая их часть проникает в ту область полупроводника, где он обладает электронной проводимостью. Здесь фотоны света вступают во взаимодействие с внешними электронами атомов полупроводника, заставляя их покинуть пределы своих атомов и стать свободными электронами. Последние же,

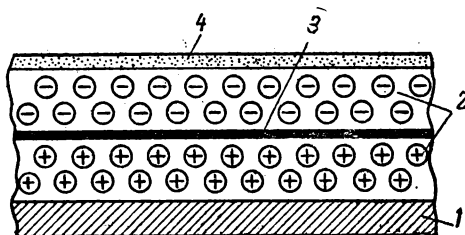


Рис. 15. Схематическое изображение полупроводникового вентильного фотоэлемента:

1 — металлический электрод; 2 — полупроводник с «дырочной» + и электронной — проводимостями; 3 — запирающий слой; 4 — полупрозрачный металлический слой

покинув атомы, относительно легко переходят через запирающий слой 3 и проникают в ту область полупроводника, где они имеют «дырочную» проводимость. В результате нижняя металлическая пластинка 1 зарядится отрицательным электричеством (избыток электронов), а металлический слой 4 — положительным (недостаток электронов). Это значит, что между металлической пластиной 1 и полупрозрачным металлическим слоем 4 возникает некоторая разность потенциалов (напряжение). Если же электроды соединены проводниками, то в данной цепи будет протекать электрический ток. Этот ток будет продолжаться до тех пор, пока не прекратится поступление фотонов света (электромагнитного поля) в полупроводник. Следовательно, в рассмотренном нами полупроводниковом фотоэлементе происходит преобразование энергии фотонов света, или, иначе сказать, энергии электромагнитного поля, в энергию электрическую.

В современной технике полупроводниковые фотоэлементы находят весьма широкое применение. В настоящее время выпускаются весьма совершенные по своей конструкции и качеству полупроводниковые фотоэлементы, например селеновые, германиевые, кремниевые, сернисто-серебряные и т. д. Таким образом, проблема преобразования в широких масштабах световой энергии солнечных лучей в энергию электрическую стала вполне разрешимой. Известно, например, что в ясный солнечный день кремниевые фотоэлементы могут снимать с 1 квадратного метра поверхности, освещаемой солнцем, электрическую энергию мощностью примерно в 50 ватт.

Наряду с полупроводниковыми фотоэлементами широкое применение получили полупроводниковые термоэлементы, например, при радиофикации населенных пунктов, не снабжаемых электрической энергией. Удобство применения термоэлемента заключается в том, что в нем электроэнергия получается непосредственно за счет тепловой энергии. Например, полупроводниковый термоэлемент типа ТК-3, изготавливаемый отечественной электропромышленностью, может полностью обеспечить электроэнергией многоламповый радиоприемник «Родина» при подогреве его керосиновой лампой.

Свойство полупроводников резко изменять свою электропроводимость с изменением температуры дало возможность использовать их в качестве термосопротивлений. Полупроводниковые термометры, изготовленные из термосопротивлений, дают возможность измерять температуру в весьма широких пределах с точностью до тысячных долей градуса Цельсия.

Полупроводники находят теперь весьма широкое применение в радиотехнике. Например, кристаллический германиевый усилитель, имеющий размер не более спичечной головки и в то же время весьма простой по своему устройству и надежный в эксплуатации, с успехом заменяет усилительную электронную лампу.

Благодаря применению полупроводниковых приборов удается значительно уменьшить вес и габариты радиотехнических устройств. К примеру, ультракоротковолновый радиопередатчик, построенный из полупроводниковых материалов, свободно размещается в футляре для карманных часов.

Весьма интересен тот факт, что электрическая батарея элементов, построенная из полупроводников совместно с радиоактивным элементом стронцием, может давать без подзаряда непрерывно электрический ток на протяжении примерно двух десятков лет.

Применяя полупроводниковый материал люминофор, удалось построить «лампы дневного света», весьма экономичные и дающие неизнурительное для глаз освещение.

Не будет ошибочным утверждать, что полупроводниковые приборы в ближайшем будущем окажут весьма сильное влияние на технический прогресс во многих отраслях техники, и в частности в технике связи, автоматике, вычислительных и управляющих машинах и т. д.

§ 11. ДИЭЛЕКТРИКИ

Диэлектриками, или, иначе, изоляторами, называются такие вещества, которые практически не проводят электричества. К диэлектрикам относятся кристаллы солей, каучук, эбонит, стекло, фарфор, слюда, минеральные масла, газы и ряд других веществ.

Диэлектрики кристаллического строения, например хлористый натрий (поваренная соль) NaCl , состоят из совокупности разноименных ионов, которые строго симметрично расположены в пространственной кристаллической решетке (см. рис. 10). Здесь электроны как положительных, так и отрицательных ионов кристалла крепко связаны с ядрами, так что при нормальном состоянии кристалла они не могут покинуть пределы этих ионов. Вследствие отсутствия свободных электронов или каких-либо иных электрически заряженных частиц в междоунонном пространстве кристалла электропроводимость кристалла практически равна нулю. Если на кристаллический диэлектрик воздействовать силами электрического поля, то в нем ток возникнуть не может. Однако все же под действием сил поля положительные ионы кристалла сместятся на весьма незначительное расстояние в направлении поля, а отрицательные ионы — навстречу полю. В результате этого диэлектрик поляризуется, т. е. на его противоположных сторонах появляются так называемые связанные электрические заряды. Эти заряды в отличие от обычных зарядов, могущих перемещаться на любые расстояния, связаны прочно с кристаллической решеткой диэлектрика и могут только смещаться на ничтожно малые расстояния. Следовательно, связанные электрические заряды нельзя снять с диэлектрика, например отвести в землю. Однако эти заряды

создают свое электрическое поле, которое изменяет силу и конфигурацию поля внешнего, осуществившего поляризацию диэлектрика.

В отличие от диэлектриков с кристаллическим строением все прочие диэлектрики, как твердые, жидкие, так и газообразные, состоят из совокупности отдельных молекул. Отсутствие свободных электронов или каких-либо иных вещественных частиц, заряженных электричеством, в междумолекулярном пространстве диэлектрика обеспечивает ему хорошие изоляционные свойства.

Существуют такие диэлектрики, молекулы которых в нормальных условиях нейтральны в электрическом отношении, так как их положительные заряды полностью компенсируются отрицательными. К подобного рода диэлектрикам относятся, например, газы: азот N_2 , водород H_2 , углекислый газ CO_2 и др.

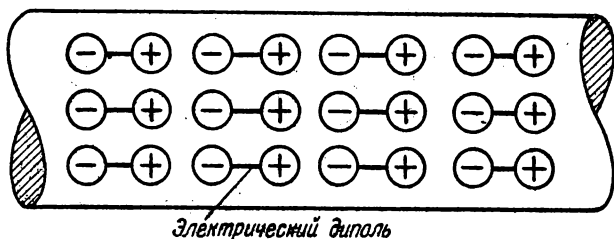


Рис. 16. Схематическое изображение поляризованного диэлектрика

Если на такой диэлектрик воздействовать силами электрического поля, то «центры тяжести» положительных и отрицательных электрических зарядов молекул несколько сместятся. В результате этого молекула превратится в так называемый электрический диполь, т. е. систему двух разноименных электрических зарядов, размещенных по некоторой оси на весьма малом расстоянии друг от друга. Под влиянием сил электрического поля в диэлектрике образуется множество электрических диполей (рис. 16), ориентированных в направлении действия этих сил. Диэлектрик с ориентированными в нем электрическими диполями становится поляризованным. Его диполи создают свое собственное электрическое поле, которое накладывается на поле внешнее, осуществившее поляризацию диэлектрика. Чем больше сила электрического поля, действующего в диэлектрике, тем более энергично осуществляется его поляризация и тем больше связанных зарядов возникает на его поверхности.

В природе существуют и такие диэлектрики, которые уже в готовом виде содержат в себе электрические диполи (жесткие дипольные молекулы). Поляризация подобных диэлектриков осуществляется в результате поворота электрических диполей, т. е. их ориентировки в направлении действия поля. К диэлек-

трикам подобного рода относятся такие жидкости, как вода, нитробензол, эфиры, органические кислоты, и такие газы, как сернистый ангидрид SO_2 , аммиак NH_3 и др.

Диэлектрики играют весьма большую роль в электротехнике. От них обычно требуются хорошие изоляционные свойства, т. е. способность не пропускать электрические токи, и большая электрическая прочность, т. е. способность выдерживать высокое электрическое напряжение.

К числу диэлектриков, широко применяемых в электротехнике, относятся: слюда для изготовления диэлектрика конденсаторов, изоляции в электронагревательных приборах, коллекторных пластин в генераторах и т. д.; фарфор для изготовления изоляторов линий передач, линий связи и т. д.; радиофарфор и ультрафарфор для изоляции в радиотехнике; резина для изоляции проводов; эбонит для устройства электроизолирующих деталей; мрамор для изготовления распределительных щитов и панелей; керамика для изготовления диэлектриков конденсаторов; шеллак для склеивания и изоляции витков катушек и др.; электрокартон для изготовления каркасов трансформаторов и катушек и т. д.

§ 12. ЭЛЕКТРОПРОВОДИМОСТЬ ГАЗОВ

Газы в нормальном состоянии являются хорошими диэлектриками (например, чистый, не ионизированный воздух). Однако, если газы содержат в себе влагу с примесью органических и неорганических частиц и при этом они ионизированы, то они проводят электричество. Электропроводимость газов зависит главным образом от степени их ионизации, которая может быть осуществлена различными способами. В основном ионизация газов осуществляется в результате отщепления электронов от нейтральной молекулы газа. Выделившийся из молекулы газа электрон перемещается в междумолекулярном пространстве газа, и здесь в зависимости от рода газа он может сохранить относительно долго «самостоятельность» своего движения (например, в таких газах, как водород H_2 , азот N_2) или, наоборот, быстро проникнуть в нейтральную молекулу, превратив ее в отрицательный ион (например, в кислороде). Наибольший эффект ионизации газов достигается путем облучения их рентгеновыми, катодными лучами или лучами, испускаемыми радиоактивными веществами.

Атмосферный воздух летом весьма интенсивно ионизируется под влиянием солнечных лучей. Влага, находящаяся в воздухе, конденсируется на его ионах, образуя мельчайшие капельки воды, заряженные электричеством. В конечном итоге из отдельных электрически заряженных капелек воды образуются грозовые тучи, сопровождаемые молниями, т. е. электрическими разрядами атмосферного электричества.

ГЛАВА II

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД И ЕДИНИЦЫ ЕГО ИЗМЕРЕНИЯ

§ 13. СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

При изучении электротехники приходится иметь дело с электрическими, магнитными и механическими величинами и измерять эти величины.

Измерить электрическую, магнитную или какую-либо иную величину — это значит сравнить ее с другой однородной величиной, принятой за единицу.

В электротехнике применяется ряд систем единиц, с помощью которых измеряются электрические и магнитные величины. В настоящей книге мы будем пользоваться абсолютной практической электромагнитной системой единиц МКСА, получившей за последнее время наиболее широкое применение в электротехнике. Одновременно с этим в книге будут приведены и некоторые иные системы единиц, которые еще до сих пор встречаются в электротехнической литературе.

В абсолютной практической электромагнитной системе единиц МКСА за единицу длины принимается 1 метр (1 м), за единицу массы — масса 1 килограмма (1 кг), за единицу времени — 1 секунда (1 сек.) и за единицу электрического тока — 1 ампер (1 а). В соответствии с этим наименование абсолютной практической электромагнитной системы единиц сокращенно обозначается символом МКСА, где М обозначает метр, К — килограмм, С — секунда, А — ампер.

Все прочие единицы измерения электрических, магнитных и механических величин — производные от вышеуказанных четырех основных единиц.

В табл. 2 приведены основные и механические единицы системы единиц МКСА.

Система единиц МКСА может быть рационализированной и нерационализированной.

Рационализированная система единиц МКСА — это такая система, при которой возможна рационали-

Таблица 2

Наименования и определения основных и механических единиц системы единиц МКСА

Наименование	Сокращенное обозначение		Определение
	русским алфавитом	латинским (греческим) алфавитом	
I. Основные единицы			
Единица длины			Единица длины, определяемая платино-иридиевой мерой, носящей знак 28 и являющейся государственным эталоном длины в СССР.
Метр	<i>м</i>	<i>m</i>	
Единица массы			Единица массы, определяемая платино-иридиевой мерой, носящей знак 12 и являющейся государственным эталоном массы в СССР.
Килограмм	<i>кг</i>	<i>kg</i>	
Единица времени			Единица времени (среднего солнечного), равная ста шестнадцати миллионам пятидесяти семи тысячам шестьсот двадцати восьми десяти-миллионным (0,0000116057628) средних звездных суток.
Секунда	сек. или с.	sec или s	
Единица электрического тока			Неизменяющийся электрический ток, который, протекая по каждому из двух бесконечно длинных параллельных прямолинейных проводников ничтожно малого кругового сечения, расположенных в безвоздушном пространстве на расстоянии 2 метров друг от друга, создает между этими проводниками на каждый метр их длины силу, равную одному ньютону.
Ампер	<i>а</i>	<i>A</i>	
II. Механические единицы			
Единица скорости			Скорость равномерно и прямолинейно движущейся точки, перемещающейся на 1 метр в 1 секунду.
Метр в секунду	<i>м/сек.</i>	<i>m/sec</i>	
Единица ускорения			Ускорение равномерно-ускоренно и прямолинейно движущейся точки, скорость которой изменяется на 1 метр в секунду за 1 секунду.
Метр на секунду в квадрате	<i>м/сек²</i>	<i>m/sec²</i>	
Единица силы			Сила, сообщаемая массе в 1 килограмм ускорение в 1 метр на секунду в квадрате.
Ньютон	<i>н</i>	<i>n</i>	

Наименование	Сокращенное обозначение		Определение
	русским алфавитом	латинским (греческим) алфавитом	
Единица работы Джоуль или ватт-секунда	<i>дж</i> <i>вт-с</i>	<i>J</i> <i>W-s</i>	Работа, производимая силой в 1 ньютон при перемещении точки приложения этой силы на 1 метр по ее направлению.
Единица мощности Ватт	<i>вт</i>	<i>W</i>	Мощность, при которой в течение 1 секунды равномерно производится работа в 1 джоуль.

Примечание. Сила в 1 ньютон = 10^5 дин = 0,102 килограмма (силы).
Работа в 1 джоуль = 1 ньютон \times 1 метр = 10^6 дин \times 10^2 сантиметров = 10^7 эрг.

зация записи некоторых исходных уравнений электротехники путем введения в них множителя 4π . Благодаря этому наиболее часто применяемые расчетные формулы электротехники избавляются от коэффициента 4π и становятся более удобными для применения и запоминания. В рационализированной же системе единиц МКСА множитель 4π отсутствует в мало применяемых для расчета формулах и, наоборот, имеется в широко применяемых. Преимущество рационализированной системы перед нерационализированной заключается в том, что при рациональной форме записи уравнений электромагнитного поля уравнения электрического и магнитного полей аналогичны по построению. Поэтому мы будем в настоящей книге применять систему единиц МКСА при рациональной записи уравнений электротехники.

Помимо системы единиц МКСА, в научной и технической литературе широко применяются так называемые абсолютная электростатическая (СГСЭ) и абсолютная электромагнитная (СГСМ) системы единиц.

В абсолютной электростатической системе единиц (СГСЭ) за единицу длины принимается 1 сантиметр (1 см), за единицу массы — масса 1 грамма (1 г), за единицу времени — 1 секунда (1 сек.); одновременно с этим диэлектрическая проницаемость «пустоты» ϵ_0 принимается равной отвлеченной (безразмерной) единице. В соответствии с этим абсолютная электростатическая система единиц сокращенно обозначается символом СГСЭ, где С — сантиметр, Г — грамм, С — секунда, Э — электростатическая.

В абсолютной электромагнитной системе единиц (СГСМ) за единицу длины принимается 1 сантиметр (1 см), за единицу

массы — масса 1 грамма (1 г), за единицу времени — 1 секунда (1 сек.); одновременно с этим магнитная проницаемость «пустоты» μ_0 принимается равной отвлеченной (безразмерной) единице. В соответствии с этим абсолютная электромагнитная система единиц сокращенно обозначается символом СГСМ (С — сантиметр, Г — грамм, С — секунда, М — магнитная).

В конце книги приведена сводная таблица (приложение, разд. II), в которой даны соотношения между единицами МКСА, СГСЭ и СГСМ систем единиц.

Воспользовавшись основными единицами системы единиц МКСА, мы можем дать определения всем прочим единицам измерения электрических и магнитных величин, с которыми будем встречаться при дальнейшем изложении настоящего Курса электротехники.

§ 14. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД ФИЗИЧЕСКОГО ТЕЛА

В предыдущей главе мы выяснили, что всякое вещество состоит из мельчайших частиц, называемых атомами. Каждый атом представляет собой систему, состоящую из заряженного положительным электричеством центрального ядра и вращающихся вокруг него электронов, обладающих отрицательным электричеством.

Если в атоме имеется поровну электронов и протонов и они размещены так, что электрически взаимно компенсируют друг друга, то такой атом по отношению к внешней среде электрически нейтрален. Это значит, что всякий электрический заряд, расположенный вне данного атома, не будет испытывать на себе действие его электрических зарядов (электронов и протонов).

Если атом теряет хотя бы один из своих электронов, то он становится положительным ионом. Разобщенные электрические заряды — электрон, покинувший пределы атома, и образовавшийся положительный ион — уже не в состоянии уравновесить друг друга. Они стремятся вновь соединиться и образовать нейтральный в электрическом отношении атом.

Атом, потерявший один электрон, превращается в однозарядный положительный ион; атом, потерявший два электрона, — в двухзарядный положительный ион и т. д.

Наоборот, атом, получивший один лишний электрон, превращается в однозарядный отрицательный ион, а получивший два лиших электрона — в двухзарядный отрицательный ион и т. д.

Следовательно, величина и знак электрического заряда иона зависят от величины избытка или недостатка электронов в атоме, из которого образовался данный ион.

Теперь допустим, что в каком-нибудь физическом теле, например в стекле, удалось изъять из значительного числа атомов

часть их электронов. Это значит, что стекло, потеряв часть своих электронов, окажется заряженным положительным электричеством, так как в нем положительные заряды получили перевес над отрицательными.

Изъятые из стекла электроны исчезнуть не могут и должны быть где-то размещены. Допустим, что после того как электроны были изъятые из стекла, они оказались размещенными на металлическом шарике. Тогда очевидно, что металлический шарик, получивший лишние электроны, зарядился отрицательным электричеством, так как в нем отрицательные заряды получили перевес над положительными.

Наэлектризовать физическое тело — значит создать в нем избыток или недостаток электронов, т. е. нарушить в нем равновесие двух противоположностей, а именно положительных и отрицательных зарядов.

Наэлектризовать два физических тела одновременно и совместно разноименными электрическими зарядами — значит изъять из одного тела электроны и передать их другому телу.

Если где-либо в природе образовался положительный электрический заряд, то одновременно с ним неизбежно должен возникнуть такой же по абсолютной величине отрицательный заряд, так как всякий избыток электронов в любом физическом теле возникает за счет недостатка их в каком-нибудь другом физическом теле.

Разноименные электрические заряды выступают в электрических явлениях как неизменно сопутствующие друг другу противоположности, единство и взаимодействие которых составляет внутреннее содержание электрических явлений в веществах.

Указание на то, что положительное электричество противоположно отрицательному, мы находим у Ленина в «Философских тетрадах». Перечисляя важнейшие противоречия в природе и обществе, Ленин пишет:

«В математике $+$ и $-$. Дифференциал и интеграл.

» механике действие и противодействие.

» физике положительное и отрицательное электричество.

» химии соединение и диссоциация атомов.

» общественной науке классовая борьба».

(В. И. Ленин. Философские тетради. Изд. ОГИЗ, 1947 г., стр. 327.)

Способов электризации физических тел достаточно много. Здесь мы ограничимся только кратким описанием некоторых из них.

1. Если цинковую пластину погрузить в раствор серной кислоты H_2SO_4 , то она частично в нем растворится. Часть атомов цинковой пластины, оставив по два своих электрона на цинковой

пластине, перейдет в раствор серной кислоты в виде двухзарядных положительных ионов цинка Zn^{++} . В результате цинковая пластина зарядится отрицательным электричеством (избыток электронов), а раствор серной кислоты — положительным (избыток положительных ионов цинка).

Это явление электризации цинка в растворе серной кислоты использовано в гальваническом элементе как основной процесс возникновения электрической энергии.

2. Если на поверхности таких металлов, как цинк, цезий и некоторые другие, падают лучи света, то с этих поверхностей выделяются свободные электроны в окружающую среду. В результате металл заряжается положительным электричеством, а окружающее его пространство — отрицательным. Испускание электронов освещенными поверхностями некоторых металлов называется фотозэффектом, нашедшим себе применение в фотоэлементах. Явление фотозэффекта было открыто русским ученым А. Г. Столетовым. Им был построен первый фотоэлемент, послуживший прототипом современных фотоэлементов.

3. Если металлическое тело нагреть до состояния белого каления, то с его поверхности будут вылетать свободные электроны в окружающее пространство. В результате этого металл, потерявший электроны, зарядится положительным электричеством, а окружающая среда — отрицательным. Термоэлектронная эмиссия металла используется в электронных лампах.

4. Если спаять концы двух разнородных проволок, например висмутовой и медной, и место их спая нагреть, то свободные электроны частично перейдут из медной проволоки на висмутовую. В результате медная проволока зарядится положительным электричеством, а висмутовая — отрицательным. Явление электризации двух физических тел при поглощении ими тепловой энергии используется в термоэлементах.

5. Опытом установлено, что при трении разнородных тел друг о друга они заряжаются равными по абсолютной величине, но различными по знаку электрическими зарядами.

Если, например, стеклянную палочку потереть куском шелковой материи, то стекло зарядится положительным электричеством, а шелковая материя — отрицательным. Это значит, что со стекла часть электронов перешла на шелк и в первом из них получился недостаток электронов, а во втором — избыток их.

Подобный же опыт можно провести и с рядом других тел; например, янтарь, сургуч, эбонит при трении их о мех заряжаются отрицательным электричеством, а мех — положительным.

Знак электрического заряда, получающегося при трении тел, зависит от природы этих тел, от состояния их поверхностей и от ряда других причин. Поэтому не исключена возможность, что

одно и то же физическое тело может в одном случае зарядиться положительным, а в другом — отрицательным электричеством; например, металлы при трении их о стекло и шерсть электризуются отрицательно, а при трении о каучук — положительно.

Независимо от того, по какому принципу работает тот или иной источник электрической энергии, в каждом из них происходит процесс электризации физических тел, т. е. разделение электрических зарядов, имеющихся в источнике электрической энергии, и сосредоточение их на определенных местах, например на электродах или зажимах источника электрической энергии. В результате этого процесса на одном из зажимов источника электрической энергии (катоде) получается избыток отрицательных зарядов (электронов), а на другом зажиме (аноде) — недостаток электронов, т. е. первый из них заряжается отрицательным, а второй — положительным электричеством.

§ 15. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА

Электрическим зарядом, или, иначе, количеством электричества, данного физического тела называется величина избытка или недостатка электронов в этом теле.

Измерить электрический заряд — это значит сравнить его с другими зарядами, принятыми за единицу.

Элементарным отрицательным электрическим зарядом является электрический заряд электрона, а элементарным положительным зарядом — заряд позитрона (протона). Казалось бы, что в качестве единиц измерения отрицательных и положительных электрических зарядов можно было взять соответственно электрические заряды электрона и позитрона. Однако численное значение этих зарядов очень мало и пользоваться ими для измерения электрических зарядов в практической электротехнике крайне неудобно. Например, через нить электрической лампочки средней мощности каждую секунду проходит несколько миллиардов (миллиардов миллиардов) электронов.

В абсолютной практической электромагнитной системе единиц МКСА за единицу измерения величины электрического заряда (количества электричества) принят 1 кулон (к, С).

Между кулоном и зарядом электрона существует следующее численное соотношение:

$$1 \text{ кулон} = 6,29 \cdot 10^{18} \text{ зарядов электрона,}$$

или один кулон электричества численно равен 6,29 миллиардам зарядов электрона.

В табл. 3 приведены единицы измерения количества электричества, их условные обозначения и соотношения их с основной единицей.

Таблица 3

Единицы измерения количества электричества в системе единиц МКСА

Наименование величины и ее обозначение	Название единицы	Обозначение		Соотношение с основной единицей
		русское	международное	
Количество электричества q	кулон	<i>к</i>	С	—
	милликулон	<i>мк</i>	мС	$10^{-3} к$
	микркулон	<i>мкк</i>	μС	$10^{-6} к$

Между одной из основных величин системы единиц МКСА—током 1 ампер— и электрическим зарядом 1 кулон существует простое соотношение:

$$1 \text{ ампер} = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ секунда}},$$

т. е. если через поперечное сечение проводника ежесекундно проходит один кулон электричества, то ток в проводнике равен одному амперу.

Примечание. В абсолютной электростатической системе единиц СГСЭ за единицу измерения электрического заряда принимается 1 абсолютная электростатическая единица заряда (количество электричества), которая специального названия не имеет.

Между 1 кулоном и 1 СГСЭ единицей электрического заряда существует такое соотношение:

$$1 \text{ кулон} = 3 \cdot 10^9 \text{ СГСЭ единиц электрического заряда.}$$

ГЛАВА III

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

§ 16. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ

Всякая совокупность электрических зарядов обладает электрическим полем и совместно с ним образует единую материальную систему.

Следовательно, всякое изменение взаимного расположения электрических зарядов в данной системе, равно как и изменение величин этих зарядов во времени, неизбежно связано с изменением их электрического поля.

Электрическое поле — это такой вид материи, через который осуществляется физический процесс взаимодействия электрических зарядов — взаимное притяжение разноименных электрических зарядов и отталкивание одноименных.

Если взаимодействие электрических зарядов осуществляется через их собственное электрическое поле, значит, поле действует непосредственно на эти заряды.

В природе имеется бесконечное многообразие электрических полей, отличающихся друг от друга по своей конфигурации, по силе, по электрической энергии, запасенной в них, и т. д.

Для исследования электрических полей обычно применяют пробный электрический заряд, т. е. единичный положительный заряд, настолько малый по величине, что его присутствие в исследуемом электрическом поле практически не влияет ни на силу, ни на энергию, ни на конфигурацию этого поля.

Если пробный электрический заряд внести в электрическое поле, то на него будет действовать сила поля, или, иначе говоря, электрическая сила, стремящаяся перемещать его в строго определенном направлении.

Траектория, которую опишет пробный электрический заряд при своем перемещении под действием сил поля, называется электрической силовой линией.

Направление электрической силовой линии совпадает с направлением движения вдоль нее пробного электрического заряда.

Следовательно, электрическая силовая линия — это линия геометрическая, в любой точке которой сила поля F_e (электрическая сила), действующая на пробный электрический заряд q , совпадает с направлением касательной к этой линии (рис. 17).

Электрические силовые линии начинаются на положительных электрических зарядах и оканчиваются на отрицательных. Это понятно, так как пробный электрический заряд под действием поля всякий раз будет перемещаться от положительного заряда

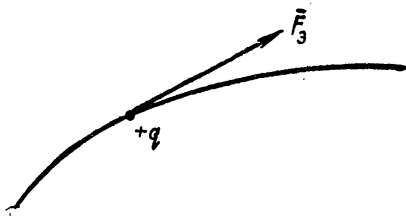


Рис. 17. Электрическая силовая линия

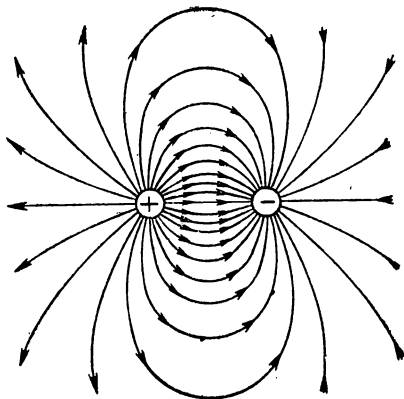


Рис. 18. Силовые линии электрического поля направлены от положительных зарядов к отрицательным

к отрицательному. На рис. 18 изображены силовые линии электрического поля системы двух разноименных электрических зарядов. Здесь мы видим, что электрические силовые линии имеют направление от положительного заряда к отрицательному, что и отмечено на этих линиях условными стрелками.

Графическое изображение электрического поля с помощью электрических силовых линий облегчает изучение этого поля. Во-первых, направление электрических силовых линий дает представление о направлении поля и, следовательно, о направлении действия электрических сил в каждой точке поля; во-вторых, густота расположения электрических силовых линий, как это мы увидим далее, характеризует величину силы поля.

Всякое электрическое поле, как некоторый вид материи, обладает энергией. Величина энергии электрического поля зарядов зависит от количества электрических зарядов, создающих это поле, от их взаимного расположения, от физических свойств той среды, где существует это поле. Следовательно, при всяком изменении взаимного расположения электрических зарядов в поле энергия этого поля как-то должна изменяться по своей величине.

Если электрические заряды перемещаются под влиянием сил поля, например разноименные электрические заряды сближаются или одноименные удаляются, то электрическая энергия этого поля убывает, так как в этом случае она преобразуется в иные виды энергии.

Наоборот, если какие-либо внешние силы, называемые обычно сторонними силами $F_{ст}$, будут удалять друг от друга разноименные электрические заряды или сближать одноименные, то они, преодолевая сопротивление этому движению со стороны сил поля зарядов $F_э$, будут совершать некоторую работу за счет расхода какой-нибудь иной энергии, например химической, механической и т. д. В результате этого энергия электрического поля зарядов возрастет.

Силы поля зарядов $\vec{F}_э$ и внешние (сторонние) силы $\vec{F}_{ст}$ в рассматриваемом нами явлении выступают как силы противоречивые, стремящиеся перемещать электрические заряды в прямо противоположных направлениях. От соотношения величин этих сил зависят характер и направление движения электрических зарядов в поле.

Всякое электрическое поле зарядов занимает некоторую область пространства. Однако оно не является резко ограниченным материальным объектом. Если говорят, что электрическое поле зарядов занимает некоторую область пространства, то под этим подразумевают, что во всех прочих областях пространства оно настолько слабо себя проявляет, что действием сил его там можно практически пренебречь.

О наличии электрического поля зарядов в данной области пространства можно судить по силам поля, которые действуют на электрические заряды, имеющиеся в этом поле.

§ 17. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

В природе все движется, все изменяется. В ней нет и не может быть застывших форм. Это в полной мере относится и к любой совокупности взаимодействующих электрических зарядов, связанных электрическим полем в единую материальную систему. Вся совокупность электрических зарядов вместе с их электрическим полем всегда перемещается в пространстве. Одновременно с этим и внутри самой этой системы заряды как-то перемещаются относительно друг друга, изменяются с течением времени по величине, например в результате взаимной нейтрализации разноименных зарядов. В соответствии с этим и электрическое поле зарядов является в общем случае переменным полем, изменяющимся в пространстве и во времени. Однако в пределах этой формы движения материи, как и всякой иной, возможны случаи относительного покоя, т. е. в рассматриваемый отрезок времени изменимость взаимного расположения электри-

ческих зарядов в поле и их величин настолько мала, что ею можно практически пренебречь. В этом случае с достаточной точностью можно считать, что рассматриваемая система электрических зарядов является статической, а ее электрическое поле — электростатическим.

Следовательно, электростатическим полем называется такое электрическое поле, которое создано относительно неподвижными в пространстве и практически неизменными во времени электрическими зарядами.

Изучить электростатическое поле — это значит определить величины, характеризующие это поле в каждой его точке. Такими величинами, как это мы увидим далее, являются напряженность и потенциал электрического поля. Зная их, можно определить силы, действующие на электрические заряды, помещенные в различные точки поля, работу сил поля при переносе зарядов из одной точки поля в другую, энергию, запасенную в электрическом поле, и ряд других физических величин.

Изучение электростатических полей — весьма важная задача электротехники, так как на практике очень часто приходится иметь дело с подобными полями. В настоящей главе мы рассмотрим основные величины, характеризующие электростатическое поле.

§ 18. ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Допустим, что в некоторой области пространства имеется электростатическое поле, создаваемое системой относительно

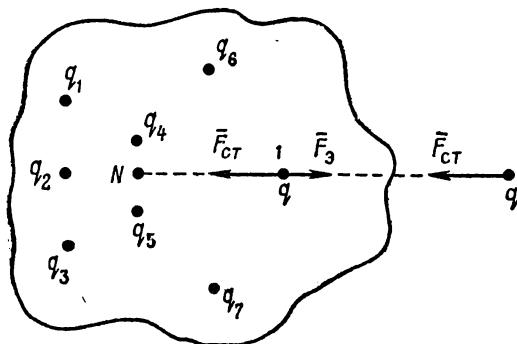


Рис. 19. Сторонняя сила $F_{\text{ст}}$, перемещая электрический заряд q , вносит его в электрическое поле

неподвижных в пространстве и неизменных во времени электрических зарядов, а за пределами этого поля находится некоторый посторонний для этой системы электрический заряд q (рис. 19). Приложим к заряду q стороннюю силу $F_{\text{ст}}$, которая внесет его в заданное электростатическое поле и будет перемещать его

там, преодолевая сопротивление силы электростатического поля F_e . Следовательно, сторонняя сила, перемещая электрический заряд q в поле, будет совершать некоторую работу, а энергия электростатического поля в соответствии с этим будет непрерывно возрастать.

Если сторонняя сила, переместив заряд q в точку I электростатического поля, совершила работу A_1 , то соответственно энергия электростатического поля возросла на величину W_1 , равную этой работе.

Теперь допустим, что в точку I электростатического поля внесен единичный положительный заряд. В соответствии с этим приращение энергии электростатического поля изменится в q раз по сравнению с предыдущим случаем, когда в точку I поля был внесен заряд q . Приращение энергии электростатического поля, отнесенное к единичному положительному заряду, в этом случае можно выразить следующей формулой:

$$\varphi_1 = \frac{W_1}{q}, \quad (4)$$

где φ_1 — приращение энергии электростатического поля, отнесенное к единичному положительному заряду;

W_1 — приращение энергии электростатического поля, связанное с помещением в точку I поля электрического заряда q .

Приращение энергии электростатического поля, приходящееся на единичный положительный заряд, помещенный в исследуемую точку поля, называется электрическим потенциалом этой точки поля.

Следовательно, если положительный электрический заряд q своим присутствием в некоторой произвольной точке N поля увеличивает энергию этого поля на величину W_N , то потенциал φ_N этой точки поля равен

$$\varphi_N = \frac{W_N}{q}. \quad (5)$$

Так как приращение энергии электростатического поля численно равно работе сторонней силы, затраченной при переносе электрического заряда из-за пределов поля в данную точку его, то можно сказать, что потенциал данной точки электростатического поля численно равен той работе, которую должна совершать сторонняя сила при переносе единичного положительного заряда из-за пределов поля в данную его точку.

Исходя из формулы (5), можно определить размерность потенциала

$$[\varphi_N] = \left[\frac{W_N}{q} \right] = \frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}} = \text{вольт},$$

т. е. размерность потенциала в системе единиц МКСА выражается в джоулях на кулон или, иначе, в вольтах, так как джоуль на кулон иначе называется вольтом.

В соответствии с этим за единицу измерения потенциала в системе единиц МКСА принят 1 вольт (1 в, 1 V).

Если в формуле (5) положить $W_N = 1$ джоуль и $q = 1$ кулон, то получим

$$1 \text{ ВОЛЬТ} = \frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ кулон}},$$

т. е. потенциал данной точки равен одному вольту, если при переносе в нее из-за пределов поля электрического заряда, равного одному кулону, сторонняя сила совершила работу, равную одному джоулю.

Пример 2. Определить потенциал точки 1 электростатического поля, если известно, что при переносе из-за пределов поля в эту точку электрического заряда $q = 2 \cdot 10^{-8}$ к сторонняя сила совершила работу $A_1 = 4 \cdot 10^{-5}$ дж.

Решение. Так как электрический заряд q перемещался в поле сторонней силой, то энергия поля увеличилась на величину, равную

$$W_1 = A_1 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ дж.}$$

В соответствии с этим потенциал исследуемой точки поля будет равен

$$\varphi_1 = \frac{W_1}{q} = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 10^{-8}} = 2000 \text{ в.}$$

В табл. 4 приведены единицы измерения потенциала электростатического поля и их соотношение с основной единицей.

Таблица 4

Единицы измерения потенциала электростатического поля в системе единиц МКСА

Наименование величины и ее обозначение	Название единицы	Обозначение		Соотношение с основной единицей
		русское	международное	
Потенциал φ	вольт	в	V	—
	киловольт	кв	kV	10^3 в
	милливольт	мв	mV	10^{-3} в
	микровольт	мкв	μV	10^{-6} в

Если электростатическое поле создано совокупностью только положительных электрических зарядов, то потенциалы всех его точек положительны, так как при переносе единичного положительного заряда из-за пределов поля в любую точку его сторон-

няя сила будет совершать работу, которая идет на приращение потенциальной энергии поля.

Если, наоборот, электростатическое поле создается совокупностью отрицательных электрических зарядов, то потенциалы всех его точек отрицательны, так как при переносе единичного положительного заряда из-за пределов поля в любую точку его будет работать не сторонняя сила, а сила электростатического поля за счет расхода энергии этого поля. Следовательно, работа сил поля в данном случае отрицательна, поскольку она связана с убылью энергии электростатического поля. А это значит, что потенциалы всех точек электростатического поля, созданного совокупностью отрицательных зарядов, — величины отрицательные.

Пример 3. Требуется определить потенциал точки I электростатического поля, если известно, что при переносе из-за пределов поля в данную точку его I положительного заряда $q = 4 \cdot 10^{-8}$ к сила поля совершила работу $A_1 = 6 \cdot 10^{-6}$ дж.

Решение. Так как в рассматриваемом случае работала сила поля, то работа ее связана с убылью энергии электростатического поля, т. е. она является отрицательной величиной:

$$W_1 = A_1 = -6 \cdot 10^{-6} \text{ дж.}$$

В соответствии с этим потенциал точки I поля равен

$$\varphi_1 = \frac{W_1}{q} = \frac{-6 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-8}} = -150 \text{ в.}$$

Итак, мы видим, что потенциал электростатического поля может быть как положительной, так и отрицательной величиной, т. е. это величина алгебраическая. Естественно, возникает вопрос, какие же точки электростатического поля имеют потенциалы, равные нулю.

Условно принято считать, что потенциал точек поверхности земли равен нулю. Следовательно, всякий металлический проводник, соединенный с землей (заземленный проводник), имеет потенциал, равный нулю. Всякий положительный потенциал больше потенциала земли и отрицательного потенциала, а потенциал земли в свою очередь больше отрицательного потенциала.

Потенциал электростатического поля можно сравнить с высотой подъема физического тела. Подобно тому как высоту подъема физического тела, например высоту вершины горы, можно сравнивать с уровнем поверхности воды в океане, который условно принят равным нулю, так и потенциалы любых точек электростатического поля можно сравнивать с потенциалом земли, условно принятым равным нулю.

Геометрическое место точек электростатического поля, обладающих одинаковыми по величине потенциалами, называется равнопотенциальной (эквипотенциальной) поверхностью. Примером равнопотенциальной поверхности может служить поверхность всякого статически заряженного металлического проводника.

§ 19. НАПРЯЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Сила электрического поля перемещает положительные электрические заряды всегда от точек с более высокими потенциалами к точкам с меньшими потенциалами, т. е., иначе, в направлении падения (убывания) потенциала; наоборот, отрицательные электрические заряды она перемещает от точек с менее высокими потенциалами к точкам с более высокими потенциалами. Как в первом, так и во втором случае перемещение электрических зарядов связано с расходом энергии электростатического поля.

Чтобы подсчитать работу силы поля при переносе электрических зарядов из одних точек поля в другие, необходимо знать разность потенциалов, или напряжение между данными точками поля.

Напряжением между двумя любыми точками электростатического поля называется алгебраическая разность потенциалов этих точек поля

$$U_{1,2} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (6)$$

где $U_{1,2}$ — напряжение (разность потенциалов) между точками 1 и 2 электростатического поля в вольтах;

φ_1 — потенциал точки 1 электростатического поля в вольтах;

φ_2 — потенциал точки 2 электростатического поля в вольтах.

Формуле (6) можно придать такой вид:

$$U_{1,2} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_1}{q} - \frac{A_2}{q} = \frac{A_{1,2}}{q}, \quad (7)$$

где $U_{1,2}$ — напряжение между точками 1 и 2 электростатического поля;

q — электрический заряд, переносимый силой поля из точки 1 в точку 2 поля;

$A_{1,2}$ — работа, совершенная силой поля при переносе заряда q из точки 1 в точку 2 поля.

На основании формулы (7) можно сделать такой вывод: напряжение между любыми двумя точками электростатического поля численно равно той работе, которую совершает сила поля при переносе единичного положительного заряда из одной точки поля в другую.

Если в формуле (7) положить, что $A_{1,2} = A_1 - A_2 = 1$ дж и $q = 1$ к, то получим

$$1 \text{ вольт} = \frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ кулон}},$$

т. е. напряжение между двумя точками поля равно одному вольту, если при переносе одного кулона электричества из одной

точки поля в другую сила поля совершает работу, равную одному джоулю.

Пример 4. Требуется определить напряжение между двумя точками электростатического поля, если известно, что сила поля, переноса электрический заряд $q = 5 \cdot 10^{-8} \text{ к}$ из одной данной точки поля в другую, совершила работу $A_{1,2} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ дж}$.

Решение. Применяя формулу (7), находим

$$U_{1,2} = \frac{A_{1,2}}{q} = \frac{8 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-8}} = 1600 \text{ в.}$$

§ 20. РАБОТА СИЛЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Если известно напряжение $U_{1,2}$ между двумя любыми точками электростатического поля, то нетрудно подсчитать величину работы силы поля при переносе электрического заряда q из одной заданной точки поля в другую, так как эта работа будет в q раз больше, чем при переносе единичного заряда, т. е.

$$A_{1,2} = U_{1,2} q = (\varphi_1 - \varphi_2) q, \quad (8)$$

где $A_{1,2}$ — работа силы поля при переносе электрического заряда q из точки 1 электростатического поля в точку 2 в джоулях;

$U_{1,2}$ — напряжение между точками 1 и 2 электростатического поля в вольтах;

q — электрический заряд в кулонах.

Пример 5. Определить, какую работу совершила сила электростатического поля, если ею был перемещен заряд $q = 4 \cdot 10^{-6} \text{ к}$ из одной точки поля в другую, между которыми напряжение равно $U_{1,2} = 3000 \text{ в}$.

Решение. Применяя формулу (8), находим

$$A_{1,2} = U_{1,2} q = 3 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ дж.}$$

Из формулы (8) следует, что работа силы электростатического поля не зависит от конфигурации пройденного зарядом в поле пути, а зависит от величины этого заряда q , от разности потенциалов между точками начального и конечного положений электрического заряда q в поле.

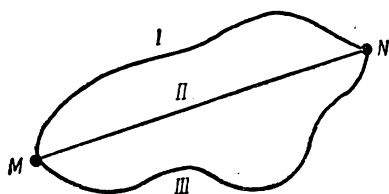


Рис. 20. Работа силы поля не зависит от пути, вдоль которого перемещается заряд

Следовательно, по какому бы из путей, I, II или III (рис. 20), ни перемещался электрический заряд q из точки M в точку N поля, величина работы силы поля остается одинаковой:

$$A_{MN} = (\varphi_M - \varphi_N) q.$$

Если бы мы пожелали электрический заряд q возвратить из

точки N в точку M электростатического поля (рис. 20), то вынуждены были бы приложить к нему стороннюю силу. Эта сила, перемещая электрический заряд q из точки N в точку M , будет совершать некоторую работу, так как на пути движения заряда она должна будет преодолеть сопротивление силы поля. Величина работы сторонней силы в этом случае будет равна

$$A_{NM} = (\varphi_N - \varphi_M) q = -(\varphi_M - \varphi_N) q = -A_{MN},$$

т. е. она численно равна работе силы поля A_{MN} , но противоположна ей по знаку, так как работа силы поля связана с уменьшением энергии электростатического поля, а работа сторонней силы — с увеличением энергии этого поля.

Следовательно, суммарная работа силы поля и сторонней силы при переносе заряда q из точки M в точку N электростатического поля и обратно равна нулю:

$$A_{MN} + A_{NM} = (\varphi_M - \varphi_N) q + (\varphi_N - \varphi_M) q = 0.$$

Отсюда вытекает весьма важный вывод, что работа силы электростатического поля при переносе электрического заряда по любому замкнутому контуру в этом поле тождественно равна нулю.

Поля, работа сил которых по любому замкнутому контуру тождественно равна нулю, называются **потенциальными полями**. Следовательно, электростатическое поле — потенциальное. Его можно сравнивать с потенциальным гравитационным полем (полем сил тяжести), в котором, как известно, работа сил при переносе физических тел зависит не от конфигурации пути, по которому перемещается физическое тело, а от разности уровней между конечным и начальным положениями тела. В соответствии с этим работа сил тяжести по любому замкнутому контуру тождественно равна нулю.

§ 21. НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Всякий электрический заряд, находящийся в электростатическом поле, испытывает на себе действие силы этого поля.

Если известна величина силы поля, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля, то легко определить силу поля F_0 , действующую на любой электрический заряд q , помещенный в эту точку поля, так как величина силы F_0 пропорциональна величине заряда q :

$$F_0 = Eq, \quad (9)$$

где F_0 — сила поля, действующая на электрический заряд, помещенный в данную точку поля;

E — сила поля, отнесенная к единичному положительному заряду, называемая напряженностью электростатического поля.

Из формулы (9) следует, что

$$E = \frac{F_э}{q}, \quad (10)$$

т. е. напряженность электростатического поля численно равна силе поля, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в исследуемую точку поля.

Исходя из формулы (10), определим размерность напряженности электростатического поля:

$$\begin{aligned} [E] &= \left[\frac{F_э}{q} \right] = \frac{\text{ньютон}}{\text{кулон}} = \frac{\text{джоуль}}{\text{метр} \cdot \text{кулон}} = \\ &= \frac{\text{вольт} \cdot \text{кулон}}{\text{метр} \cdot \text{кулон}} = \frac{\text{вольт}}{\text{метр}}, \end{aligned}$$

т. е. напряженность электростатического поля в системе единиц МКСА выражается в вольтах на метр.

В соответствии с этим за единицу измерения напряженности электростатического поля принимается $1 \frac{\text{вольт}}{\text{метр}} \left(1 \frac{\text{в}}{\text{м}}, 1 \frac{\text{В}}{\text{м}} \right)$.

Если в формуле (10) положить, что $F_э = 1$ ньютон и $q = 1$ кулон, то будем иметь

$$E = \frac{1 \text{ ньютон}}{1 \text{ кулон}} = 1 \frac{\text{вольт}}{\text{метр}},$$

т. е. напряженность электростатического поля в данной его точке равна одному вольту на метр, если в этой точке поля на электрический заряд, равный одному кулону, действует сила поля, равная одному ньютону.

В табл. 5 приведены единицы измерения напряженности электростатического поля и их соотношения с основной единицей.

Таблица 5

Единицы измерения напряженности электростатического поля в системе единиц МКСА

Наименование величины и ее обозначение	Название единицы	Обозначение		Соотношение с основной единицей
		русское	международное	
Напряженность поля E	вольт на метр	$\frac{\text{в}}{\text{м}}$	$\frac{\text{В}}{\text{м}}$	—
	вольт на сантиметр	$\frac{\text{в}}{\text{см}}$	$\frac{\text{В}}{\text{см}}$	$10^2 \frac{\text{в}}{\text{м}}$

Пример 6. Определить напряженность электростатического поля в данной точке, если в ней на электрический заряд $q = 5 \cdot 10^{-8}$ к, действует сила поля $F_э = 2 \cdot 10^{-4}$ ньютона.

Решение. Применяя формулу (10), находим

$$E = \frac{F_э}{q} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-8}} = 4000 \frac{\text{в}}{\text{м}}.$$

Зная величину напряженности электростатического поля, можно по формуле (9) определить величину силы поля, действующей на любой электрический заряд, помещенный в данную точку поля.

Пример 7. Требуется определить силу поля, действующую на электрический заряд $q = 4 \cdot 10^{-7} \text{ К}$, помещенный в точку электростатического поля, где напряженность поля $E = 15\,000 \frac{\text{в}}{\text{м}}$.

Решение. Исходя из формулы (9), находим

$$F_э = Eq = 15 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-7} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ ньютона.}$$

Так как напряженность электрического поля есть сила, отнесенная к единице заряда, то она является величиной векторной, т. е. характеризующейся не только численным значением, но и направлением в пространстве.

Направление вектора напряженности электрического поля в любой точке последнего совпадает с направлением действия электрической силы на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля.

Следовательно, вектор напряженности электрического поля \vec{E} в любой точке совпадает с касательной к силовой линии, проходящей через эту точку (рис. 21). В соответствии с этим электрическую силовую линию называют также линией вектора напряженности электрического поля.

Электростатическое поле в общем случае неоднородно, т. е. его напряженность изменяется по величине и направлению при переходе из одной точки в другую. Примером неоднородного электростатического поля может служить поле двух точечных разноименных электрических зарядов (см. рис. 18). Здесь напряженность поля изменяется при переходе из одной точки поля в другую по величине и направлению.

Там, где напряженность поля численно больше, электрические силовые линии расположены более густо. При графическом изображении электростатического поля с помощью силовых линий плотность этих линий обычно подбирают такой, чтобы она в любом данном месте поля была пропорциональна напряженности поля в этом месте.

Однородным электростатическим полем называется такое поле, в котором напря-

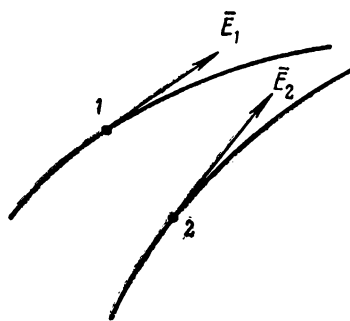


Рис. 21. Линии вектора \vec{E}

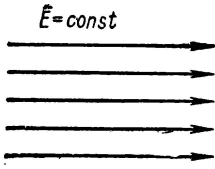


Рис. 22. Однородное электростатическое поле

женность всюду одинакова по величине и направлению. В соответствии с этим электрические силовые линии в однородном электростатическом поле направлены параллельно друг другу и расположены всюду с одинаковой плотностью. На рис. 22 графически изображено однородное электростатическое поле.

§ 22. ЗАКОН КУЛОНА

Допустим, что задана совокупность двух неподвижных относительно друг друга взаимодействующих электрических зарядов. Предположим также, что данные заряды точечные, т. е. они размещены на таких физических телах, линейные размеры которых весьма малы по сравнению с расстояниями между этими телами.

Так как рассматриваемые точечные заряды неподвижны относительно друг друга, то их совместное электрическое поле является электростатическим. Это поле действует на размещенные в нем электрические заряды, и через него осуществляется взаимодействие зарядов. Чем больше величина этих зарядов, тем при всех прочих равных условиях больше напряженность их электростатического поля и тем с большей силой оно действует на заряды. Следовательно, сила взаимодействия электрических зарядов находится в зависимости от величин этих зарядов. А это значит, что величину этой силы можно математически выразить через величины зарядов. Зависимость силы взаимодействия точечных зарядов от их величин впервые была сформулирована французским ученым Ш. О. Кулоном (1736—1806) в 1775 г. Она получила в науке название **закона Кулона**.

Сила взаимодействия двух точечных зарядов пропорциональна произведению величин этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Закон Кулона в абсолютной практической рационализованной системе единиц МКСА выражается следующей формулой:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2}, \quad (11)$$

где F — сила взаимодействия электрических зарядов в ньютонах (рис. 23);

r — расстояние между зарядами в метрах;

q_1, q_2 — величины электрических зарядов в кулонах;

ϵ — диэлектрическая проницаемость среды.

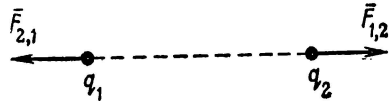


Рис. 23. Сила взаимодействия двух одноименных электрических зарядов

Диэлектрическая проницаемость среды ϵ — величина, характеризующая влияние этой среды на силу взаимодействия помещенных в нее электрических зарядов. Из формулы (11) следует, что чем больше диэлектрическая проницаемость среды, тем при прочих равных условиях меньше сила взаимодействия электрических зарядов.

Исходя из формулы (11), определим размерность диэлектрической проницаемости ϵ в системе единиц МКСА:

$$[\epsilon] = \left[\frac{q_1 q_2}{4\pi F r^2} \right] = \frac{\text{кулон} \cdot \text{кулон}}{\text{ньютон} \cdot \text{метр}^2} = \frac{\text{кулон}^2}{\frac{\text{джоуль}}{\text{метр}} \cdot \text{метр}^2} = \\ = \frac{\text{кулон}^2}{\text{вольт} \cdot \text{кулон} \cdot \text{метр}} = \frac{\text{кулон}}{\text{вольт} \cdot \text{метр}}.$$

Но величина $\frac{\text{кулон}}{\text{вольт}}$ называется фарадой, а поэтому размерность диэлектрической проницаемости в системе единиц МКСА выражается в фарадах на метр

$$[\epsilon] = \frac{\text{кулон}}{\text{вольт} \cdot \text{метр}} = \frac{\text{фарада}}{\text{метр}}.$$

В соответствии с этим за единицу измерения диэлектрической проницаемости в системе единиц МКСА принята одна фарада на метр $\left(1 \frac{\text{ф}}{\text{м}}, 1 \frac{\text{Ф}}{\text{м}}\right)$.

Диэлектрическую проницаемость ϵ обычно выражают в виде произведения двух сомножителей:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0, \quad (12)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, которая в рационализированной МКСА системе единиц принимается равной

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{фарада}}{\text{метр}},$$

ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды — число отвлеченное, показывающее, во сколько раз диэлектрическая проницаемость данной среды больше, чем диэлектрическая проницаемость вакуума.

В табл. 6 приведены величины относительной диэлектрической проницаемости наиболее употребляемых на практике веществ.

Таблица 6

Относительная диэлектрическая проницаемость некоторых веществ

Наименование материала	Относительная диэлектрическая проницаемость	Наименование материала	Относительная диэлектрическая проницаемость
Асфальт естественный	2—4	Мрамор	8—10
Базальт	10—12	Оргстекло	3,2—3,6
Бакелит	3,8—5,0	Парафин	2,2—2,3
Бумага кабельная сухая	2,3—3,5	Резина листовая	2,6—3,5
Бумага, пропитанная маслом	3,4—3,7	Слюда мусковит	6—7,5
Воздух	1,0	Слюда флогонит	4—5,5
Воск пчелиный	2,8—2,9	Стеатит	5,5—6,5
Гетинакс, сорт А и Б	7—8	Стекло	5,5—10
Дуб парафинированный	4,5—5	Тиконд	60—80
Карболит	3—5	Фарфор	5—7,5
Лакоткань	3,5—5	Фибра	3,5
Масло трансформаторное	2—2,5	Шифер	4—16
Миканит	4,6—6	Черезин	2,1—2,3
		Эбонит	2,4—4,5
		Электрокартон ЭМ	2,5—4
		Тибар	6000—8000

Пример 8. Определить силу взаимодействия двух точечных зарядов, $q_1 = 4 \cdot 10^{-6}$ Кл и $q_2 = 25 \cdot 10^{-6}$ Кл, помещенных в среду с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 2$ на расстоянии $r = 0,1$ м друг от друга.

Решение. Применяя формулу (11), находим

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2} = \frac{4 \cdot 10^{-6} \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{4\pi \cdot 2 \cdot \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot 0,1^2} = 45 \text{ ньютон.}$$

Исходя из формулы (11), можно определить напряженность электростатического поля, создаваемого уединенным точечным зарядом:

$$E = \frac{F}{q_2} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon r^2}, \quad (13)$$

т. е. напряженность электростатического поля, создаваемого уединенным точечным зарядом, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от точки расположения заданного точечного заряда.

Пример 9. Определить напряженность электростатического поля в воздухе ($\epsilon_r = 1$), создаваемого точечным уединенным зарядом $q = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл на расстоянии $r = 1$ м от него.

Решение. Применяя формулу (13), находим

$$E = \frac{q_1}{4\pi\epsilon r^2} = \frac{2 \cdot 10^{-8}}{4\pi \cdot 1 \cdot \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot 1^2} = 180 \frac{\text{вольт}}{\text{метр}}.$$

Если электростатическое поле создано совокупностью точечных электрических зарядов, то напряженность результирующего поля равняется геометрической

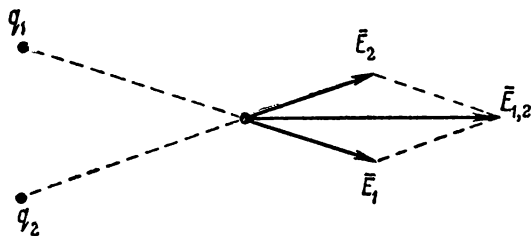


Рис. 24. Напряженность электростатического поля \vec{E} равна геометрической сумме напряженностей полей точечных зарядов

сумме напряженностей полей всех заданных точечных зарядов (рис. 24):

$$\vec{E}_{\text{рез}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n. \quad (14)$$

ГЛАВА IV

ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

§ 23. ПРОВОДНИКИ ПЕРВОГО РОДА В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Допустим, что некоторый проводник *A* (рис. 25) заряжен отрицательным электричеством и в электростатическое поле этого проводника вносится другой, незаряженный металлический проводник *B*. Назовем электростатическое поле проводника *A* по отношению к проводнику *B* внешним полем и напряженность его обозначим через $E_{\text{внеш}}$. Это внешнее поле при внесении в него проводника *B* образуется не только вне последнего, но и внутри него. Свободные электроны проводника *B*, очутившись во внешнем поле, будут испытывать на себе действие сил этого поля и начнут перемещаться вдоль металлического проводника от точек с меньшими потенциалами к точкам с большими потенциалами, т. е. навстречу полю, с некоторой средней скоростью v .

Причиной возникновения электрического тока в металлическом проводнике явилось электрическое поле, под влиянием сил которого свобод-

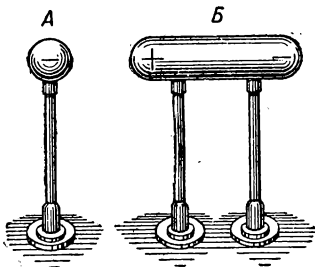


Рис. 25. Вблизи заряженного проводника *A* на проводнике *B* появляется электричество двух знаков

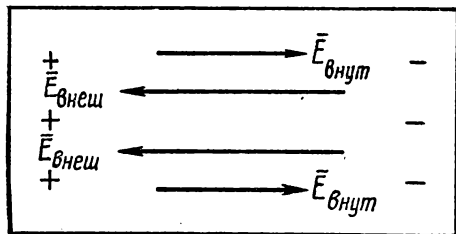


Рис. 26. Внутреннее и внешнее поля в металлическом проводнике направлены навстречу друг другу

ные электроны получили способность направленно и упорядоченно перемещаться в проводнике.

По мере того как под действием сил внешнего поля поток свободных электронов движется вдоль проводника, на одном из концов его появляется избыток электронов, а на другом конце наблюдается их недостаток.

А это значит, что в проводнике произошло перераспределение электрических зарядов, возникли два противоположных по знаку, но равных по величине электрических заряда. Проводник перестал быть электрически нейтральным, так как он зарядился двумя разноименными электрическими зарядами, размещенными на его концах, и сам стал источником электрического поля. Внутри проводника это поле, как и всякое электрическое поле вообще, направлено от положительных зарядов к отрицательным. Назовем это поле в отличие от внешнего поля внутренним полем и напряженность его обозначим через $E_{\text{внут}}$.

Нетрудно видеть, что внутреннее поле проводника, возникшее в нем в результате разделения его разноименных электрических зарядов, направлено навстречу внешнему полю, осуществившему это разделение зарядов. Из рис. 26 мы видим, что вектор напряженности внешнего электрического поля $\vec{E}_{\text{внеш}}$ направлен навстречу вектору напряженности внутреннего поля $\vec{E}_{\text{внут}}$. Интенсивность процесса электризации проводника зависит от соотношения двух противоречивых сил — сил внешнего и внутреннего электростатических полей.

По мере того как электроны все более и более накапливаются на одном из концов проводника, а на другом конце увеличивается положительный заряд, растет напряженность внутреннего поля $E_{\text{внут}}$. Если сила внешнего поля $E_{\text{внеш}}$ с течением времени не изменится, то противодействие сил внутреннего поля силам внешнего поля будет все более возрастать, и, наконец, наступит такой момент, когда эти силы сравняются, уравновесят друг друга, т. е. напряженности этих полей по величине станут равными, но противоположно направленными (рис. 27):

$$|E_{\text{внут}}| = |E_{\text{внеш}}|.$$

Тогда результирующая сила, действующая на свободные электроны в проводнике, будет равна нулю и направленное движение потока свободных электронов вдоль проводника прекратится, т. е. исчезнет электрический ток проводимости.

Хотя в проводнике вновь установилось состояние равновесия зарядов, но оно резко отличается по качеству от предыдущего

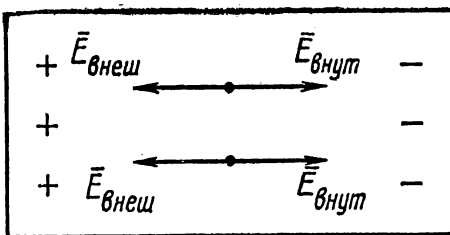


Рис. 27. Внутреннее и внешнее поля взаимно уравновешивают друг друга

состояния их равновесия. Теперь в нем взаимодействуют две противоположности: силы внешнего и внутреннего полей, направленные навстречу друг другу, и на концах проводника сосредоточены разноименные электрические заряды.

Установившееся равновесие сил внешнего и внутреннего полей в проводнике будет наблюдаться до тех пор, пока силы внешнего поля сохранятся неизменными.

Теперь допустим, что заряженный проводник *A* (см. рис. 25) начнет удаляться и вследствие этого внешнее поле внутри проводника *B* будет исчезать. В этом случае силы внутреннего поля в проводнике *B* получат перевес над силами внешнего поля и поток свободных электронов вновь начнет направленное движение. Но в отличие от предыдущего случая поток электронов будет теперь перемещаться с конца проводника, заряженного отрицательным электричеством, к концу проводника, заряженного положительным электричеством.

Свободные электроны, переместившись на противоположный конец проводника, нейтрализуют имеющиеся там положительные заряды. Когда исчезнет внешнее поле, а вместе с ним и поле внутреннее, прекратится направленное движение потока свободных электронов внутри проводника, т. е. электрический ток проводимости. В проводнике вновь возникнет статическое состояние, но с совершенно новым качеством по сравнению с предыдущим. Теперь исчезло внешнее поле, а с ним вместе и внутреннее поле, а свободные электроны равномерно распределились по всей длине проводника.

Рассмотренный процесс электрического тока проводимости в проводнике будет длиться весьма незначительное время, измеряемое долями секунды, так как свободные электроны очень быстро распределятся в проводнике и поле внешнее уравнивается полем внутренним.

Для того чтобы электрический ток проводимости в проводнике существовал продолжительное время, необходимо создать такие условия, чтобы электроны в проводнике в процессе их движения нигде не накапливались и внутри проводника постоянно действовало внешнее электрическое поле. Для этого необходимо выполнить особые условия, с которыми мы подробно ознакомимся впоследствии.

Свободные электроны при своем беспорядочном (тепловом) движении в проводнике обладают относительно большими скоростями движения. Скорость же направленного движения потока свободных электронов в металлах, создающего электрический ток проводимости, относительно мала: она измеряется долями миллиметра в секунду. Однако электрическое поле распространяется вдоль проводников со скоростью, близкой к скорости распространения света (300 000 км/сек). А это значит, что, каковы бы ни были размеры проводника, все его свободные электроны

практически одновременно придут в движение под влиянием возникшего внешнего поля.

Явление наведения двух разноименных и равных по абсолютной величине электрических зарядов в проводнике в присутствии другого электрически заряженного проводника называется **электростатической индукцией**.

Это явление легко продемонстрировать при помощи разъемного проводника *Б*, соединенного по концам с электроскопами (рис. 28).

Если обе половины проводника *Б* соединены, то при поднесении к нему проводника *А*, заряженного отрицательным электричеством, листочки электроскопа разойдутся, что говорит о наличии зарядов на концах проводника *Б*. При удалении проводника *А* листочки электроскопа опадут, что говорит об исчезновении зарядов с концов проводника *Б*.

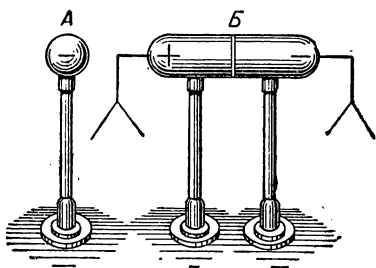


Рис. 28. На разъемном проводнике *Б* индуцировано электричество двух знаков

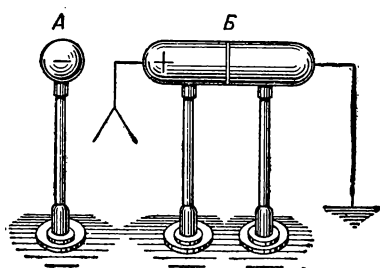


Рис. 29. Электроны с проводника *Б* ушли в землю

Если, не удаляя заряженного проводника *А*, разъединить обе половины проводника *Б*, то листочки электроскопа не опадут даже в том случае, если проводник *А* удалить. Значит, разъединенные электрические заряды сохранились на изолированных друг от друга половинах проводника *Б*.

Знаки зарядов на разноименно заряженных половинах проводника *Б* можно определить, прикасаясь к ним телами, наэлектризованными положительно или отрицательно.

При соприкосновении разноименно заряженных половин проводника *Б* листочки электроскопов тотчас же сходятся, так как заряды на них, будучи противоположными по знаку и равными по абсолютной величине, взаимно нейтрализуются.

Если к проводнику *Б* поднести проводник *А*, заряженный отрицательным электричеством, и, не удаляя последний, соединить проводник *Б* с землей (рис. 29), то с проводника *Б* электроны уйдут в землю и на нем останется только положительный заряд. Последний связан с отрицательным зарядом проводником *А*, а поэтому нейтрализоваться зарядами земли он не может. После отсоединения проводника *Б* от земли и удаления заряженного проводника *А* положительный заряд проводника *Б* сохраняется.

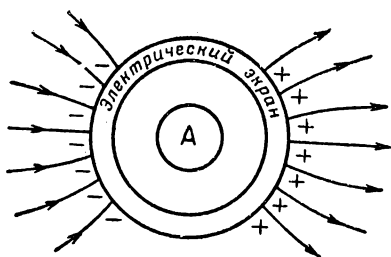


Рис. 30. Прибор А экранирован от внешнего электростатического поля

Количество наведенного (индуцированного) электричества на проводнике *Б* будет меньше, чем количество индуктирующего электричества, имеющегося на проводнике *А*. В частном случае, если проводник *А* окружить проводником *Б*, то на последнем индуцируются разноименные электрические заряды, порознь равные по абсолютным значениям индуктирующему электрическому заряду.

При электростатической индукции разделение электрических зарядов в проводнике происходит до тех пор, пока поле внешнее не будет полностью уравновешено полем внутренним. Отсутствие поля внутри проводника, находящегося в электростатическом поле, может быть использовано для экранирования. Если необходимо освободить прибор от влияния посторонних электростатических полей, то его обычно окружают металлическим проводником, или, иначе, экраном (рис. 30).

Электрические силовые линии внешнего поля в данном случае не смогут проникнуть внутрь прибора.

§ 24. ДИЭЛЕКТРИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Допустим, что две металлические пластины, расположенные своими плоскостями параллельно друг другу, заряжены равными по абсолютной величине, но противоположными по знаку электрическими зарядами $+q$ и $-q$. Электростатическое поле, со-

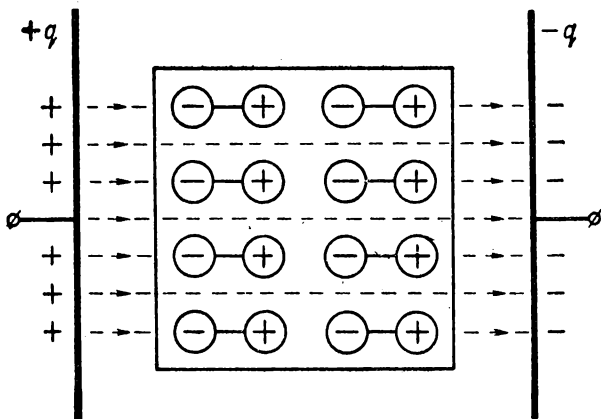


Рис. 31. Диэлектрик в электростатическом поле.

здаваемое этими зарядами, однородно. Внесем в это поле кусок плоского диэлектрика, боковые грани которого расположены параллельно заряженным металлическим пластинам (рис. 31). Под влиянием сил электростатического поля, создаваемого зарядами $+q$ и $-q$ металлических пластин, диэлектрик поляризуется. Это значит, что нейтральные в электрическом отношении молекулы диэлектрика превратились в электрические диполи или находящиеся в диэлектрике ранее в готовом виде диполи повернулись своими осями в направлении действия сил поля.

Напомним, что электрическим диполем называется совокупность двух равных по абсолютной величине, но различных по знаку электрических зарядов, расположенных на очень малом расстоянии друг от друга по сравнению с расстоянием от диполя до точек наблюдения. На рис. 32 показаны поле электрического диполя и поле внешнее, под влиянием сил которого данный диполь образовался из нейтральной молекулы.

Электрические диполи, ориентировавшись своими осями в направлении действия сил внешнего поля, образовали на боковых поверхностях диэлектрика электрические заряды. При этом на левой стороне диэлектрика (см. рис. 31) образовался поверхностный отрицательный заряд, а на правой — положительный. Эти заряды, в отличие от зарядов металлических пластин, называемых свободными, — связанные, так как их нельзя ни отделить друг от друга, ни отвести с диэлектрика. Это объясняется тем, что связанные заряды принадлежат электрическим диполям.

Связанные электрические заряды диэлектрика образовали в нем свое собственное электростатическое поле, направленное навстречу полю внешнему. Это значит, что результирующее электростатическое поле в диэлектрике слабее, чем поле внешнее. Следовательно, диэлектрик с помощью своих связанных электрических зарядов ослабляет внешнее электростатическое поле. Картина этого ослабления поля внутри диэлектрика изображена на рис. 31 с помощью силовых линий. Мы видим, что густота их в пространстве между металлическими заряженными пластинами и диэлектриком больше, чем внутри диэлектрика, так как часть силовых линий внешнего поля, заканчивая свой путь на связанных электрических зарядах диэлектрика, не проникает в глубину последнего. Следовательно, напряженность

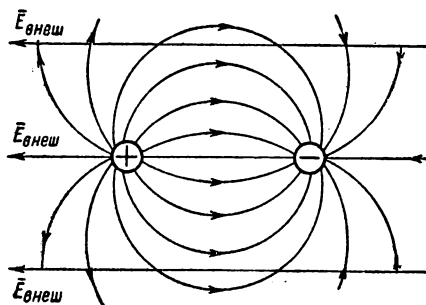


Рис. 32. Поле электрического диполя

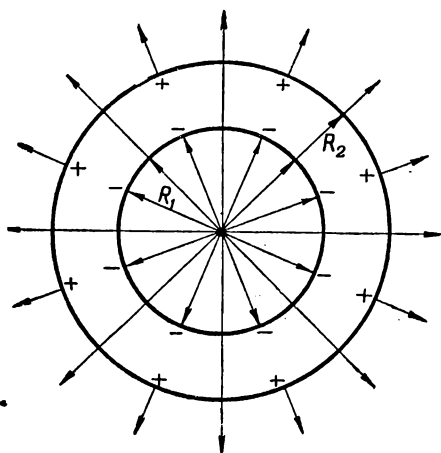


Рис. 33. Электростатическое поле точечного заряда, окруженного шаровым слоем диэлектрика

электростатического поля в пространстве между металлическими пластинами и диэлектриком будет больше, чем внутри этого диэлектрика.

Чем больше диэлектрическая проницаемость диэлектрика, тем больше (при всех прочих равных условиях) величина его связанных электрических зарядов и тем, значит, слабее в нем результирующее электростатическое поле.

Напряженность и потенциал электростатического поля в диэлектрике (при всех прочих равных условиях) **во столько раз меньше соответственно напряженности и потен-**

циала поля в вакууме, во сколько раз диэлектрическая проницаемость этого диэлектрика больше, чем диэлектрическая проницаемость вакуума.

Пример 10. Точечный заряд $q = 4 \cdot 10^{-9}$ к помещен в среду с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{r_1} = 1$ и окружен шаровым слоем диэлектрика, имеющим относительную диэлектрическую проницаемость $\epsilon_{r_2} = 5$ и радиусы внутренней и внешней поверхностей, соответственно равные $R_1 = 0,1$ м и $R_2 = 0,15$ м (рис. 33). Шаровой слой расположен симметрично относительно заряда. Определить напряженность электростатического поля, создаваемого данным зарядом в точках, удаленных от него на расстояния $r_1 = 0,05$ м, $r_2 = 0,12$ м и $r_3 = 0,2$ м.

Решение. По формуле (13) находим:

$$E_1 = \frac{q}{4\pi\epsilon_{r_1}\epsilon_0 r_1^2} = \frac{4 \cdot 10^{-9}}{1 \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^9} \cdot (0,05)^2} = 14\,400 \frac{\text{в}}{\text{м}};$$

$$E_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_{r_2}\epsilon_0 r_2^2} = \frac{4 \cdot 10^{-9}}{5 \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^9} \cdot (0,12)^2} = 500 \frac{\text{в}}{\text{м}};$$

$$E_3 = \frac{q}{4\pi\epsilon_{r_1}\epsilon_0 r_3^2} = \frac{4 \cdot 10^{-9}}{1 \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^9} \cdot (0,2)^2} = 900 \frac{\text{в}}{\text{м}}.$$

Так как источником электростатического поля являются как свободные, так и связанные электрические заряды, то электрические силовые линии (линии вектора напряженности электростатического поля) могут иметь начало как на свободных, так и на связанных положительных зарядах, а конец — на свободных и связанных отрицательных зарядах. Это значит, что при переходе потока электрических силовых линий (общего числа сило-

вых линий) через плоскость раздела двух диэлектриков с различными диэлектрическими проницаемостями часть линий заканчивается на этой плоскости, так как на ней имеются связанные электрические заряды поляризованных диэлектриков. Но, как показывает опыт, при этом изменяется не только величина потока силовых линий, но и общее направление его.

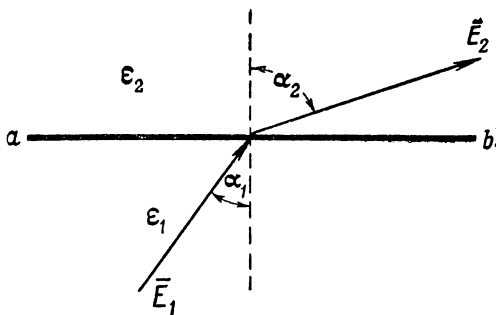


Рис. 34. Преломление электрической силовой линии

Если силовая линия падает на плоскость раздела ab двух диэлектриков под углом α_1 к ее нормали (рис. 34), то по другую сторону плоскости раздела она выходит уже под углом α_2 к нормали.

Установлено, что силовые линии испытывают преломление при переходе плоскости раздела двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями согласно следующему закону:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}, \quad (15)$$

т. е. тангенс угла падения (угла α_1) силовой линии так относится к тангенсу угла преломления (угла α_2), как относятся диэлектрические проницаемости соответствующих сред.

Пример 11. Электрическая силовая линия падает из воздуха ($\epsilon_{r_1} = 1$) на плоскость диэлектрика ($\epsilon_{r_2} = 5$) под углом $\alpha_1 = 45^\circ$ (рис. 34) к ее нормали. Требуется определить угол преломления α_2 этой силовой линии.

Решение. Применяя формулу (15), находим

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{5 \cdot \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}}{1 \cdot \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}} \cdot \operatorname{tg} 45^\circ = 5 \cdot 1 = 5.$$

По тригонометрической таблице тангенсов для $\operatorname{tg} \alpha_2 = 5$ находим, что $\alpha_2 = 78^\circ 50'$.

Из формулы (15) следует, что силовые линии при переходе из среды с большей диэлектрической проницаемостью в среду с меньшей диэлектрической проницаемостью отклоняются в сторону нормали к поверхности раздела сред.

ГЛАВА V

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ

§ 25. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ ПРОВОДНИКА И ЕДИНИЦЫ ЕЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Опытом установлено, что между зарядом и потенциалом любого уединенного металлического проводника существует прямая пропорциональная зависимость, т. е. во сколько раз увеличится или уменьшится заряд данного проводника, во столько раз соответственно увеличится или уменьшится потенциал этого проводника. Эта пропорциональная зависимость между зарядом и потенциалом уединенного проводника выражается следующей формулой:

$$q = C\varphi, \quad (16)$$

где q — электрический заряд проводника;

φ — потенциал проводника;

C — коэффициент пропорциональности, называемой электрической емкостью или просто емкостью проводника.

Из формулы (16) следует, что

$$C = \frac{q}{\varphi}, \quad (17)$$

т. е. емкость проводника равна отношению его заряда к потенциалу. Это значит, что емкость проводника численно равна заряду, приходящемуся на единицу потенциала этого проводника.

Следовательно, чем больше емкость проводника, тем большее необходимо при всех прочих одинаковых условиях сообщить ему количество электричества, чтобы поднять величину его потенциала на единицу.

Если один проводник имеет емкость в n раз большую, чем другой проводник, то при заряде их до одинакового потенциала потребуется сообщить первому из них количество электричества в n раз большее, чем второму. Следовательно, можно сказать, что емкость проводника есть величина, характеризующая способность проводника накапливать в себе электрические заряды.

Исходя из формулы (17), определим размерность емкости:

$$[C] = \left[\frac{q}{\varphi} \right] = \frac{\text{кулон}}{\text{вольт}} = \text{фарада},$$

т. е. емкость в системе единиц МКСА имеет размерность фарады.

В соответствии с этим за единицу измерения емкости в системе единиц МКСА принята 1 фарада (1 ф, 1 F).

Если в формуле (17) положить, что $q = 1$ кулон и $\varphi = 1$ вольт, то получим

$$C = \frac{q}{\varphi} = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ вольт}} = 1 \text{ фарада},$$

т. е. проводник обладает емкостью в одну фараду, если при сообщении ему одного кулона электричества его потенциал изменяется на один вольт.

В табл. 7 приведены единицы измерения емкости и соотношения между ними.

Таблица 7

Единицы измерения емкости в системе единиц МКСА

Наименование величины и ее обозначение	Название единицы	Обозначение		Соотношение с основной единицей
		русское	международное	
Емкость C	фарада	ф	F	—
	микрофарада	мкф	μF	10^{-6} ф
	пикофарада	пф	pF	10^{-12} ф

Пример 12. Требуется определить емкость проводника, если известно, что при сообщении ему электрического заряда $q = 4 \cdot 10^{-5}$ к потенциал его изменился на величину $\varphi = 2 \cdot 10^3$ в.

Решение. Применяя формулу (17), находим

$$C = \frac{q}{\varphi} = \frac{4 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 10^3} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ ф} = 0,02 \text{ мкф}.$$

Емкость проводника не зависит от его материала. Например, медный, свинцовый, серебряный и другие шарики одинакового радиуса обладают совершенно одинаковыми емкостями.

Емкость проводника не зависит от его массы. Два проводника, имеющие одинаковые массы, но различные конфигурации, могут обладать различными емкостями.

Емкость проводника зависит от величины его поверхности. Это и понятно, так как электрические заряды на проводнике в статическом состоянии размещаются только по его поверх-

ности, а поэтому чем больше поверхность проводника, тем легче разместиться на нем электрическим зарядам.

На емкость проводника влияет среда, в которой размещен проводник. С ростом диэлектрической проницаемости среды емкость проводника растет в прямой пропорциональной зависимости. Если, например, проводник из воздуха перенести в керосин, то его емкость увеличится примерно в два раза.

На емкость проводника влияет соседство других проводников. Чем ближе размещать проводники один к другому, тем большей становится их емкость. В этом случае обычно говорят не о емкости одного проводника, а о емкости системы проводников.

Емкость системы двух проводников численно равна тому заряду, который надо сообщить одному из этих проводников, чтобы разность потенциалов (напряжение) между ними изменилась на единицу.

Емкость системы двух проводников равна одной фараде, если при сообщении одному из проводников одного кулона электричества разность потенциалов этих проводников изменится на один вольт.

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}. \quad (18)$$

Если создать систему из двух проводников с большой поверхностью, расположив их на малом расстоянии друг от друга в среде с большой диэлектрической проницаемостью, то можно достигнуть значительной емкости этой системы. Приборы, основанные на этом принципе, называются **конденсаторами**. Они получили большое распространение в электротехнике. В ближайших параграфах мы остановимся на описании некоторых конструкций конденсаторов и на расчете их емкостей.

Пример 13. Определить емкость C системы двух проводников, если при сообщении одному из них заряда $q = 2 \cdot 10^{-6}$ к разность потенциалов между ними возросла на $U = 400$ в.

Решение. По формуле (18) находим

$$C = \frac{q}{U} = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{400} = 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ ф} = 0,005 \text{ мкф}.$$

§ 26. ПЛОСКИЙ КОНДЕНСАТОР

Плоским конденсатором называется прибор, состоящий из двух плоских металлических пластин A и B (рис. 35), расположенных параллельно друг другу и разделенных слоем диэлектрика.

Если плоский конденсатор присоединить к зажимам источника постоянного тока (рис. 36), то пластины (обкладки) конденсатора зарядятся равными по абсолютной величине, но противоположными по знаку электрическими зарядами. При этом обкладка конденсатора, подключенная к положительному за-

жиму источника, зарядится положительным электрическим зарядом $+q$, а обкладка, подключенная к отрицательному зажиму, — отрицательным зарядом $-q$. В соответствии с этим между обкладками конденсатора, в его диэлектрике, возникнет однородное электростатическое поле, напряженность которого будет равна

$$E = \frac{U}{d}, \quad (19)$$

где E — напряженность электростатического поля в диэлектрике конденсатора в вольтах на метр;

U — напряжение на обкладках конденсатора в вольтах;

d — расстояние между обкладками конденсатора в метрах.

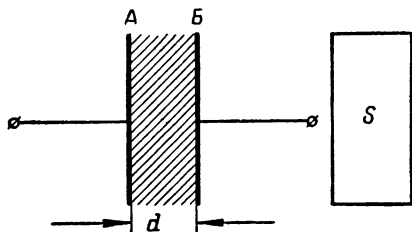


Рис. 35. Плоский конденсатор

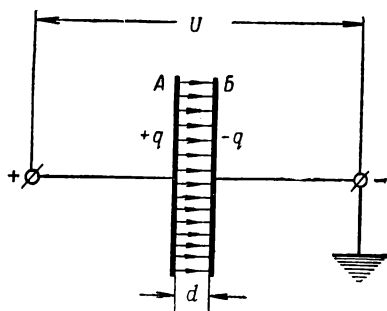


Рис. 36. Электростатическое поле плоского конденсатора

Пример 14. К плоскому конденсатору приложено напряжение $U = 250$ в. Требуется определить напряженность электростатического поля в диэлектрике конденсатора, если расстояние между обкладками конденсатора $d = 2$ мм. Решение. Применяя формулу (19), находим

$$E = \frac{U}{d} = \frac{250}{2 \cdot 10^{-3}} = 125\,000 \frac{\text{в}}{\text{м}}.$$

Емкость плоского конденсатора зависит от площади обкладок, от расстояния между обкладками и от диэлектрической проницаемости диэлектрика:

$$C = \frac{\epsilon S}{d}, \quad (20)$$

где C — емкость плоского конденсатора в фарадах;

ϵ — диэлектрическая проницаемость диэлектрика в фарадах на метр;

S — площадь каждой из обкладок конденсатора в квадратных метрах;

d — расстояние между обкладками в метрах.

Пример 15. Определить емкость плоского конденсатора, у которого площадь каждой из обкладок $S = 75 \text{ см}^2$, расстояние между обкладками $d = 2 \text{ мм}$ и относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\epsilon = 6$.
Решение. Применяя формулу (20), находим

$$C = \frac{\epsilon S}{d} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d} = \frac{6 \cdot \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot 75 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-3}} = 2 \cdot 10^{-10} \text{ ф} = 200 \text{ пф}.$$

Для увеличения емкости плоских конденсаторов их делают многопластинчатыми (рис. 37).

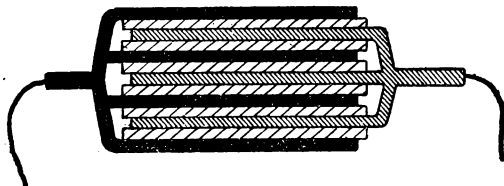


Рис. 37. Плоский многопластинчатый конденсатор (вид в разрезе)

Емкость многопластинчатого плоского конденсатора определяется по формуле

$$C = (n - 1) \cdot \frac{\epsilon S}{d}, \quad (21)$$

где n — число всех обкладок конденсатора.

Пример 16а. Требуется определить емкость плоского многопластинчатого конденсатора, имеющего $n = 500$ обкладок, если площадь каждой обкладки $S = 31,4 \text{ см}^2$, расстояние между обкладками $d = 0,005 \text{ см}$ и относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\epsilon_r = 5$.

Решение. Применяя формулу (21), находим

$$\begin{aligned} C &= (n - 1) \cdot \frac{\epsilon S}{d} = (n - 1) \cdot \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d} = \\ &= (500 - 1) \cdot \frac{5 \cdot \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot 31,4 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-5}} = 1,38 \cdot 10^{-6} \text{ ф} = 1,38 \text{ мкф}. \end{aligned}$$

§ 27. КОНДЕНСАТОРЫ

А. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ КОНДЕНСАТОРОВ И ИХ ПАРАМЕТРЫ

В современной практике применяются самые разнообразные типы конденсаторов.

С точки зрения конструктивного оформления конденсаторов они подразделяются на два основных типа: конденсаторы постоянной и переменной емкости.

По типу диэлектрика конденсаторы подразделяются на бумажные, слюдяные, керамические, воздушные и электролитические.

Основными параметрами конденсатора являются номинальная емкость, класс точности, электрическая прочность, сопротивление изоляции, потеря энергии.

Номинальной емкостью конденсатора называется емкость, на которую рассчитан данный конденсатор при его изготовлении на заводе. Она согласно общесоюзному стандарту (ГОСТ 2519—49) обычно указывается в паспорте конденсатора. Конденсаторы, выпускаемые отечественной промышленностью, имеют номинальную емкость от 1 пикофарды до 2000 микрофард.

Класс точности конденсатора определяется отношением предела допустимого отклонения фактической емкости конденсатора к номинальной емкости его, выраженной в процентах. К нулевому классу точности относят конденсаторы, у которых допустимые отклонения фактической емкости от номинальной колеблются в пределах $\pm 2\%$, к первому классу точности — в пределах $\pm 5\%$, ко второму классу точности — в пределах $\pm 10\%$ и к третьему классу точности — в пределах $\pm 20\%$.

Электрической прочностью конденсатора называют то максимальное напряжение, при котором конденсатор может работать продолжительное время (практически не менее десяти тысяч часов).

Сопротивлением изоляции конденсатора называют величину сопротивления диэлектрика конденсатора прохождению через него постоянного тока (тока утечки).

Чтобы ток утечки конденсатора был по возможности мал (практически равен нулю), сопротивление изоляции конденсатора стремятся делать как можно большим (порядка сотен или тысяч мегомов).

Потеря электрической энергии в конденсаторе обусловлена переменной поляризацией диэлектрика, в результате которой часть электрической энергии в диэлектрике преобразуется в тепло. Энергия, поглощаемая ежесекундно диэлектриком конденсатора, называется **мощностью потерь конденсатора**. Она относительно мала и в среднем составляет доли процента мощности, развиваемой генератором электрической энергии в самом конденсаторе.

Б. КОНДЕНСАТОРЫ ПОСТОЯННОЙ ЕМКОСТИ

Конденсаторы постоянной емкости не допускают изменения их емкости или ее регулировки, т. е. емкость их практически должна быть постоянной. Однако в процессе работы конденсаторов она все же может изменяться по ряду причин, и в частности от изменения температуры конденсаторов.

В зависимости от рода диэлектрика конденсаторы постоянной емкости подразделяются на бумажные, слюдяные, керамические, воздушные и электролитические.

Бумажные конденсаторы. Бумажные конденсаторы имеют в качестве диэлектрика тонкую бумагу, пропитанную парафином. Материалом обкладок являются станиолевые ленты.

Способ изготовления бумажных конденсаторов в основном сводится к следующему. Две длинные станиолевые ленты изолируют друг от друга лентами тонкой папиросной, пропитанной парафином, бумаги. Затем эти ленты сворачивают в рулон, укладывают в металлический корпус и заливают парафином. Концы станиолевых лент присоединяют к зажимам конденсатора. На рис. 38 приведено несколько типов бумажных конденсаторов. Один из них показан в развернутом виде, так что в нем видны все основные детали.

Широкое применение получили бумажные конденсаторы типа КБГ (конденсатор бумажный герметизированный). Корпуса для этого типа конденсаторов большей частью делаются металлическими, герметизация достигается путем тщательной пропайки

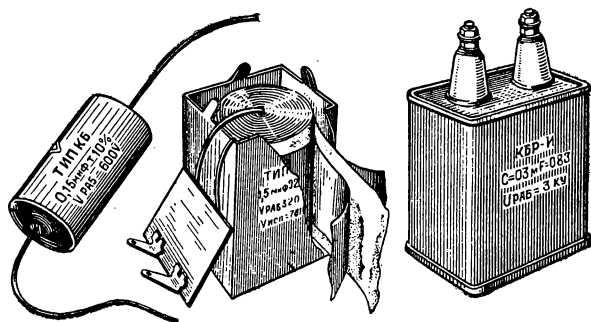


Рис. 38. Различные типы бумажных конденсаторов

швов корпуса и устройства выводов через стекловидную массу, делающую конденсатор непроницаемым для внешнего воздуха. Для бумажных конденсаторов малых емкостей иногда применяют корпуса цилиндрической формы из керамики.

В табл. 8 приведены некоторые данные бумажных герметизированных конденсаторов.

На практике получили также широкое применение конденсаторы типа МБГ (металло-бумажные герметизированные конденсаторы). Отличительная особенность этих конденсаторов — та, что в них обкладки наносятся непосредственно на бумажный диэлектрик путем вакуумного испарения.

В менее ответственных установках применяются бумажные конденсаторы типа КБ (конденсаторы бумажные негерметизированные).

Бумажные конденсаторы изготовляются различных емкостей, от сотен пикофарад до нескольких десятков микрофарад.

Рабочие напряжения, на которые рассчитаны бумажные конденсаторы, находятся в пределах 200 — 1500 в. При этом испытательное напряжение конденсаторов превышает их рабо-

Таблица 8

Некоторые данные бумажных герметизированных конденсаторов

Тип конденсатора	Рабочее напряжение, в					Конструктивное оформление
	200	400	600	1000	1500	
	Емкость, мкф					
КБГ-И	$4,7 \cdot 10^{-4} \div 0,1$	$4,7 \cdot 10^{-4} \div 0,05$	$4,7 \cdot 10^{-4} \div 0,025$	—	—	В цилиндрическом корпусе из керамики
КБГ-М	$0,025 \div 0,25$	$0,01 \div 0,25$	$0,01 \div 0,2$	—	—	В цилиндрическом металлическом корпусе
КБГ-МЛ	$0,025 \div 2,0$	$0,1 \div 1,0$	$0,01 \div 1,0$	$0,01 \div 0,5$	$0,01 \div 0,25$	В металлическом корпусе плоской формы
КБГ-МН	$1,0 \div 10,0$	$0,5 \div 8,0$	$0,5 \div 6,0$	$0,25 \div 4,0$	$0,5 \div 2,0$	В металлическом корпусе нормальной прямоугольной формы

чие напряжения примерно на 200—300%. Допустимые отклонения от номинальной емкости для некоторых типов бумажных конденсаторов могут достигать 20%.

Бумажные конденсаторы обладают рядом существенных недостатков. Например, при токах высокой частоты в них становятся относительно высокими потери энергии, индуктивное сопротивление также сильно возрастает. Поэтому бумажные конденсаторы в цепях переменного тока высокой частоты, как правило, не применяются.

Слюдяные конденсаторы. Слюдяные конденсаторы собираются из отдельных полосок металлической фольги, между которыми прокладываются тонкие пластинки слюды, играющие роль диэлектрика.

Для предохранения слюдяных конденсаторов от влияния внешних условий их герметизируют металлической обжимкой или опрессовывают пластмассой.

В отличие от бумажных конденсаторов слюдяные конденсаторы имеют большое сопротивление изоляции (сланда) и благодаря этому не имеют утечки тока. Они обладают большой электрической прочностью и имеют относительно малые потери энергии в диэлектрике. В силу этого слюдяные конденсаторы нашли достаточно широкое применение в радиотехнике, где, как известно, требуется высококачественная и стабильная работа конденсаторов.

Слюдяные конденсаторы изготовляются различных емкостей, от десятков до десятков тысяч пикофарад. Рабочее напряжение их колеблется от сотен до нескольких тысяч вольт. Допустимое отклонение емкости от номинальной — от $\pm 9\%$ до $\pm 20\%$.

Наибольшее применение на практике получили следующие типы слюдяных конденсаторов: КСО (конденсаторы слюдяные опрессованные), СОМ (конденсаторы слюдяные опрессованные малогабаритные, КСГ (конденсаторы слюдяные герметизированные) и СГМ (конденсаторы слюдяные герметизированные малогабаритные).

В табл. 9 приведены данные некоторых слюдяных конденсаторов.

На рис. 39 показан внешний вид нескольких типов слюдяных конденсаторов, применяемых в технике связи.

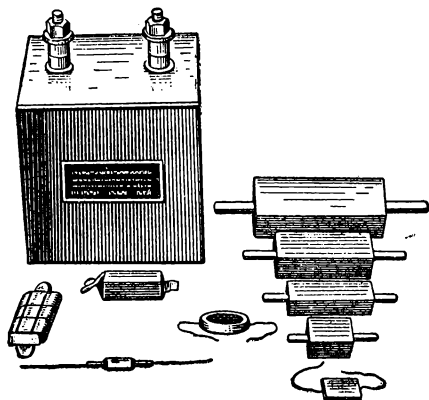


Рис. 39. Слюдяные конденсаторы

Данные некоторых слюдяных конденсаторов

Тип конденсатора	Емкость, пф	Рабочее напряжение, в	Размеры, мм
КСО-1	51—220	250	13×7×4,5
КСО-2	100—1000	500	18×11×5,5
КСО-3	470—330 3600—6800 7500—10000	500	20×20×9
		250	
СОМ-1	240—750	25	13,7×4,5
СОМ-2	750—2400	500	18×11×5,5
СОМ-3	2700—6200 6800—10000	500	20×20×6,5
		250	
КСГ-1	470—20000	500	26×24×14
КСГ-2	20000—100000	500	45×33×23
СГМ-1	100—560	250	13×9×5
СГМ-2	620—1200	250	13×9,6×6,6
СГМ-3	100—4300	500	18×13×7
СГМ-4	5800—40000 4700—6200	250	21,3×18×8,3
		500	

Керамические конденсаторы. В качестве диэлектрика в керамических конденсаторах применяется высококачественная керамика, например ультрафарфор, тиконд, ультрастеатит и др. Обкладки керамических конденсаторов выполняются в виде слоя серебра, наносимого на поверхность керамики.

Керамические конденсаторы подразделяются на два основных типа: КДК (конденсатор дисковый керамический) и КТК (конденсатор трубчатый керамический).

В табл. 10 приведены данные некоторых наиболее употребительных типов керамических конденсаторов.

Керамические конденсаторы обладают более высокими качествами по сравнению со слюдяными конденсаторами. Они имеют большое сопротивление изоляции, малые потери и относительно высокую стабильность, т. е. постоянство емкостей.

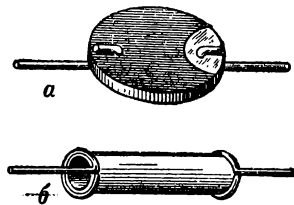


Рис. 40. Керамические конденсаторы: дисковый (а) и трубчатый (б)

Данные некоторых типов керамических конденсаторов

Тип конденсатора	Емкость, пф	Рабочее напряжение, в	Размеры, мм			Примечание
			диаметр трубки	длина трубки	диаметр диска	
КТК	2—750	500	4	11—50	—	Конденсатор трубчатый керамический
КДК	1—100	500	—	—	8—16	Конденсатор дисковый керамический
КГК	5—750	500	6,5	16—55	—	Конденсатор герметизированный керамический
КЭТ	180—620	500	6,2	11—20	—	Конденсатор эмалированный трубчатый
КЭД	30—360	250	—	—	4—12	Конденсатор эмалированный дисковый
КОД	30—200	250	—	—	8—13,5	Конденсатор керамический опрессованный дисковый

Керамические конденсаторы благодаря относительно большой толщине их диэлектриков (керамики) имеют относительно небольшую емкость, от нескольких пикофард до 1000 пикофард.

Керамические конденсаторы широко применяются в радиотехнике, и в частности в цепях аппаратуры ультракоротких волн. На рис. 40 показан внешний вид конденсаторов типа КДК (конденсатор дисковый керамический) и типа КТК (конденсатор трубчатый керамический).

Воздушные конденсаторы. Воздушные конденсаторы имеют обкладки из алюминиевых пластин, разделенных воздушными прослойками, играющими роль диэлектрика.

Воздушные конденсаторы по своим качествам выше керамических. В них потери энергии меньше, стабильность выше и сопротивление диэлектрика (воздуха) достаточно велико.

Недостаток воздушных конденсаторов — их громоздкость, поэтому они применяются сравнительно редко.

В. КОНДЕНСАТОРЫ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

Во многих случаях практики, например в радиотехнических цепях, возникает необходимость плавного изменения емкости. Для этого применяются конденсаторы переменной емкости.

Конденсаторы переменной емкости состоят из групп подвижных и неподвижных пластин (рис. 41). Подвижные пластины (ротор) при помощи ручки приводятся во вращение и могут занимать различное положение относительно неподвижных пластин (статор). Если подвижные пластины полностью перекрывают неподвижные, то емкость конденсатора максимальна, и, наоборот, если подвижные пластины полностью выведены из системы неподвижных пластин, то емкость конденсатора минимальна.

На практике широко применяются полупеременные, конденсаторы, емкость которых можно изменять в незначительных пределах. Применяются они главным образом в радиотехнических контурах как подстроечные.

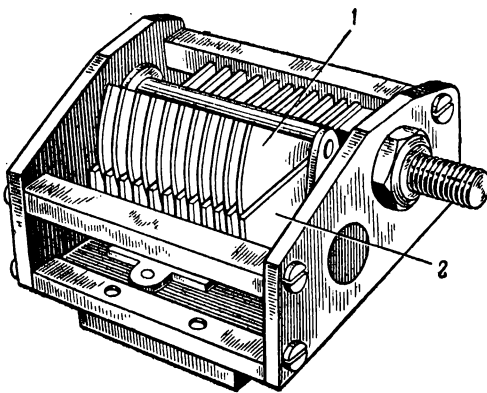


Рис. 41. Конденсатор переменной ёмкости:
1 — подвижные пластины (ротор); 2 — неподвижные пластины (статор)

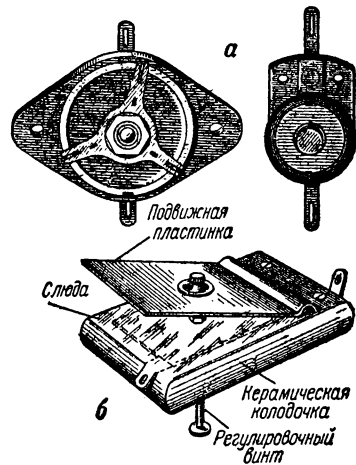


Рис. 42. Керамические подстроечные конденсаторы:
а — типа КПК; б — пружинный конденсатор

Существует несколько разновидностей полупеременных конденсаторов. Из них лучшие — конденсаторы типа КПК (керамические подстроечные конденсаторы), изображенные на рис. 42, а. В них неподвижные основания (статоры) сделаны из керамики, на поверхность которой нанесен тонкий слой серебра. Роторами конденсаторов служат керамические диски, на верхнюю поверхность которых нанесен слой серебра в виде полукруга. Таким образом, керамический полупеременный конденсатор имеет в качестве обкладок два слоя серебра, а диэлектриком — керамику. Подстройка контура с помощью подстроечного керамического конденсатора осуществляется путем поворота ротора конденсатора.

В табл. 11 приведены данные некоторых применяемых в радиотехнике керамических подстроечных конденсаторов.

Таблица 11

Данные некоторых керамических подстроечных конденсаторов

Тип конденсатора	Минимальная и максимальная емкость каждого конденсатора, пф								Рабочее напряжение, в
	2—7	4—15	6—25	8—30	—	—	—	—	
КПК-1	2—7	4—15	6—25	8—30	—	—	—	—	500
КПК-2	6—60	10—100	25—150	75—200	125—250	200—325	275—375	350—450	500

В менее ответственных установках применяются пружинные подстроечные керамические конденсаторы (рис. 42, б). Каждый из них представляет собой совокупность двух металлических обкладок (пластин), смонтированных на керамической колодочке так, что одна находится над другой. Верхняя обкладка обладает свойством плоской пружины и с помощью регулировочного винта может приближаться к нижней обкладке и удаляться от нее, чем и достигается изменение емкости конденсатора.

Г. ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Весьма широкое применение в радиотехнике получили электролитические конденсаторы.

Электролитический конденсатор состоит из двух алюминиевых пластин, погруженных в электролит, состав которого бывает различным. В процессе изготовления электролитического конденсатора через него пропускают постоянный электрический ток, присоединив одну из алюминиевых пластин его (анод) к положительному зажиму источника тока, а другую (катод) — к отрицательному. При этом в электролите происходит электролиз, т. е. разложение током электролита на составные части. В результате электролиза анод покрывается тонким слоем окисла, а катод не окисляется. Тонкая пленка окисла, образовавшаяся на аноде, является диэлектриком, а поэтому по мере возрастания толщины слоя диэлектрика электрический ток, протекающий через конденсатор, уменьшается и в конце концов совершенно прекращается. Получившийся таким образом конденсатор имеет в качестве обкладок алюминиевую пластину (анод) и электролит, а в качестве диэлектрика — слой окисла на аноде. Чтобы соединить вторую обкладку конденсатора (электролит) с отрицательным зажимом источника тока, в него и погружают вторую алюминиевую пластину (катод). Следует отметить, что если к аноду и катоду конденсатора приложить напряжение постоянного тока обратной полярности, то слой окисла на аноде будет исчезать. В результате этого конденсатор может быть электрически пробит и выйдет из строя.

Следовательно, электролитические конденсаторы обладают строго определенной полярностью, т. е. они выполняют роль конденсаторов только в том случае, когда анод (алюминиевая пластина, покрытая пленкой окисла) присоединен к положительному полюсу источника постоянного тока. Это значит, что электролитический конденсатор может работать только в цепях постоянного или пульсирующего тока. В последнем случае требуется, чтобы переменная составляющая пульсирующего тока не превышала примерно десяти процентов постоянной составляющей пульсирующего тока.

Так как пленка окисла на аноде электролитического конденсатора очень тонка, т. е. расстояние между обкладками конденсатора (анод-электролит) очень мало, то емкость этого конденсатора относительно велика. Обычно она даже при относительно малых размерах конденсатора измеряется десятками, сотнями или даже тысячами микрофард. В этом — существенное преимущество электролитических конденсаторов перед другими типами их.

Однако электролитические конденсаторы имеют и существенные недостатки. Во-первых, их нельзя применять в цепях переменного тока (изменяющегося по направлению), так как они обладают строго определенной полярностью. Во-вторых, в них имеется большая утечка тока из-за относительно большой проводимости диэлектрика (слоя окисла). В-третьих, емкость этих конденсаторов не стабильна, так как она в значительной степени зависит от температуры (например, с уменьшением температуры она уменьшается). Емкость их зависит также от приложенного напряжения: чем оно выше, тем толще становится слой диэлектрика (слой окисла) и тем меньше емкость конденсатора.

Электролитические конденсаторы обычно изготавливают следующим образом. Берут две длинные узкие ленты из алюминиевой фольги, между которыми прокладывают пропитанную электролитом матерью или фильтрованную бумагу. Затем эти ленты сворачивают в рулон, который помещают чаще всего в алюминиевый корпус и сверху прикрывают изоляцией. Анод конденсатора обычно подключается к зажиму, находящемуся на

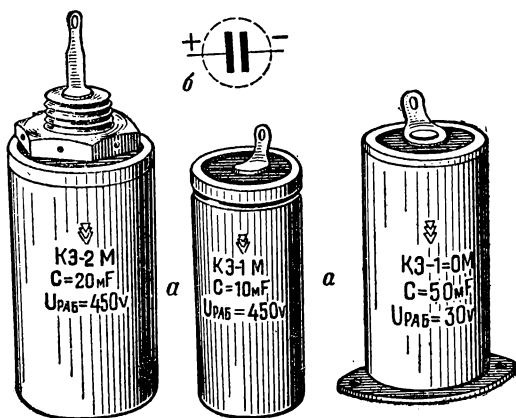


Рис. 43. Электролитические конденсаторы (а) и их условное обозначение в схемах (б)

крышке конденсатора, а катод соединен с корпусом конденсатора.

Нашей электропромышленностью выпускаются электролитические конденсаторы типа КЭ (конденсатор электролитический): КЭ-1, КЭ-2 и КЭ-3.

Конденсаторы типа КЭ подразделяются на высоковольтные и низковольтные. Первые рассчитаны на рабочее напряжение до 500 в и емкость до нескольких десятков микрофард, вторые — на рабочее напряжение до 4 в и емкость до 2000 мкф.

На рис. 43 показан внешний вид нескольких типов электролитических конденсаторов.

§ 28. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

Совокупность нескольких конденсаторов, соединенных между собой параллельно, последовательно или смешанно, называется батареей (магазином) конденсаторов.

Вначале рассмотрим параллельное соединение конденсаторов, применяемое в том случае, когда желают увеличить емкость в цепи.

На рис. 44 приведена схема батареи из трех параллельно соединенных конденсаторов, имеющих емкости C_1 , C_2 и C_3 .

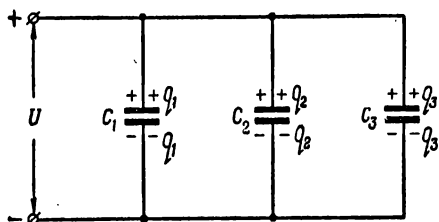


Рис. 44. Параллельное соединение конденсаторов

Так как конденсаторы соединены параллельно, то напряжения на зажимах отдельных конденсаторов равны друг другу и напряжению на зажимах источника электрической энергии, т. е.

$$U_1 = U_2 = U_3 = U, \quad (22)$$

где U — напряжение на зажимах источника электрической энергии;

U_1 , U_2 , U_3 — напряжения на зажимах соответственно первого, второго и третьего конденсаторов.

Определим общую емкость рассматриваемой батареи. Если на ее зажимах напряжение равно U , то каждый из конденсаторов зарядится некоторым количеством электричества, которое можно определить по формуле (18):

$$q_1 = C_1 U; \quad q_2 = C_2 U; \quad q_3 = C_3 U, \quad (22')$$

где q_1 , q_2 и q_3 — электрические заряды первого, второго и третьего конденсаторов.

Из формул (22') следует, что

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{C_1}{C_2}; \quad \frac{q_2}{q_3} = \frac{C_2}{C_3}; \quad \frac{q_3}{q_1} = \frac{C_3}{C_1}, \quad (23)$$

т. е. электрические заряды параллельно соединенных конденсаторов пропорциональны емкостям этих конденсаторов.

Общий заряд q всей батареи конденсаторов равен сумме зарядов отдельных конденсаторов:

$$q = q_1 + q_2 + q_3, \quad (24)$$

или, принимая во внимание формулы (22'),

$$q = C_1 U + C_2 U + C_3 U = (C_1 + C_2 + C_3) U,$$

откуда находим, что

$$\frac{q}{U} = C_1 + C_2 + C_3.$$

Но величина $\frac{q}{U}$, т. е. отношение полного заряда q всей батареи конденсаторов к напряжению U на ее зажимах, определяет собой величину общей емкости C_0 всей батареи, т. е.

$$C_0 = \frac{q}{U},$$

следовательно,

$$C_0 = C_1 + C_2 + C_3, \quad (25)$$

т. е. общая (эквивалентная) емкость батареи параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов, входящих в батарею.

Пример 166. Определить эквивалентную емкость батареи из трех параллельно соединенных конденсаторов, имеющих емкости $C_1 = 2$ мкф, $C_2 = 0,5$ мкф и $C_3 = 0,1$ мкф.

Решение. По формуле (25) находим

$$C_0 = C_1 + C_2 + C_3 = 2 + 0,5 + 0,1 = 2,6 \text{ мкф.}$$

Если конденсаторы, соединенные параллельно, обладают одинаковыми емкостями C , то общая их емкость равна произведению емкости C отдельного конденсатора на их число n в батарее, т. е.

$$C_0 = Cn. \quad (26)$$

Пример 17. Определить, сколько конденсаторов необходимо взять для составления батареи емкостью $C_0 = 2$ мкф, если имеются конденсаторы емкостью $C = 0,25$ мкф.

Решение. Число конденсаторов в батарее определим, исходя из формулы (26):

$$n = \frac{C_0}{C} = \frac{2}{0,25} = 8 \text{ конденсаторов.}$$

§ 29. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

На рис. 45 изображена батарея конденсаторов, состоящая из трех последовательно соединенных конденсаторов, имеющих емкости, соответственно равные C_1 , C_2 и C_3 .

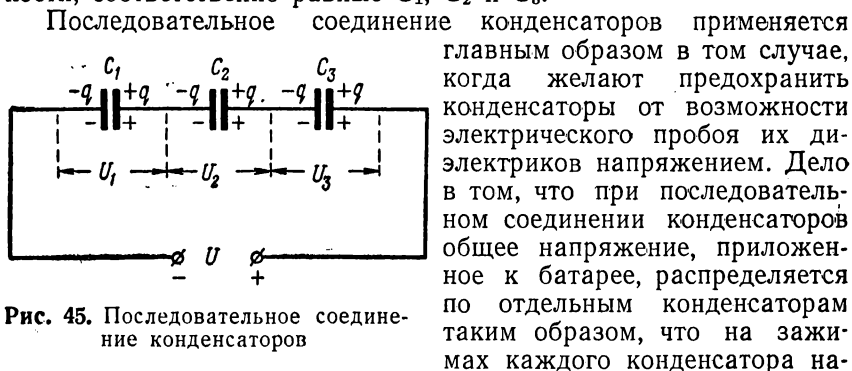


Рис. 45. Последовательное соединение конденсаторов

Последовательное соединение конденсаторов применяется главным образом в том случае, когда желают предохранить конденсаторы от возможности электрического пробоя их диэлектриков напряжением. Дело в том, что при последовательном соединении конденсаторов общее напряжение, приложенное к батарее, распределяется по отдельным конденсаторам таким образом, что на зажимах каждого конденсатора напряжение всегда меньше, чем напряжение, поданное на всю батарею в целом.

В тех случаях, когда желают уменьшить емкость цепи, также часто прибегают к составлению батареи последовательно соединенных конденсаторов, так как общая емкость батареи конденсаторов всегда меньше наименьшей емкости, входящей в батарею.

Процесс заряда батареи последовательно соединенных конденсаторов в основном сводится к следующему. Электроны от отрицательного зажима источника электрической энергии перемещаются на левую обкладку первого конденсатора и спустя незначительное время (доли секунды) заряжают ее отрицательным электричеством, величина заряда которого равна $-q$. Вследствие явления электростатической индукции правая обкладка первого конденсатора заряжается положительным электричеством ($+q$), так как с нее свободные электроны уходят на левую обкладку второго конденсатора, заряжая ее отрицательным электричеством ($-q$). Аналогично правая обкладка второго конденсатора получает заряд, равный $+q$, левая обкладка третьего конденсатора — заряд $-q$ и, наконец, правая обкладка третьего конденсатора — заряд $+q$, так как с нее свободные электроны уходят к положительному зажиму источника электрической энергии.

Следовательно, в результате заряда батареи последовательно соединенных конденсаторов она получает электрический заряд, численно равный q , и одновременно с этим каждый из конденса-

торов, входящих в батарею, в результате явления электростатической индукции получает также электрический заряд, численно равный q :

$$q_1 = q_2 = q_3 = q, \quad (27)$$

где q_1 , q_2 , q_3 — электрические заряды соответственно первого, второго и третьего конденсаторов;

q — электрический заряд батареи последовательно соединенных конденсаторов.

Общее напряжение U , приложенное ко всей батарее, равно сумме напряжений U_1 , U_2 и т. д., приложенных к отдельным конденсаторам:

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (28)$$

Согласно формуле (22')

$$q_1 = C_1 U_1; \quad q_2 = C_2 U_2; \quad q_3 = C_3 U_3.$$

А так как $q_1 = q_2 = q_3 = q$, то

$$C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_3 U_3 = q,$$

откуда находим

$$U_1 = \frac{q}{C_1}; \quad U_2 = \frac{q}{C_2}; \quad U_3 = \frac{q}{C_3}.$$

Подставив полученные выражения для U_1 , U_2 и U_3 в формулу (28), получим

$$U = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3},$$

или, после сокращения на q ,

$$\frac{U}{q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

Но

$$\frac{U}{q} = \frac{1}{C_0},$$

где C_0 — общая емкость всей батареи конденсаторов.

Следовательно,

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}, \quad (29)$$

т. е. величина, обратная общей емкости батареи последовательно соединенных конденсаторов, равна сумме величин, обратных емкостям отдельных конденсаторов, входящих в эту батарею.

Пример 18. Определить общую емкость батареи из трех последовательно соединенных конденсаторов, обладающих емкостями $C_1 = 3$ мкф, $C_2 = 4$ мкф и $C_3 = 6$ мкф.

Решение. По формуле (29) находим

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6} = \frac{9}{12},$$

откуда

$$C_0 = \frac{12}{9} = 1,33 \text{ мкф.}$$

В частном случае, если имеется только два конденсатора, соединенных последовательно, получим

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \text{ или } \frac{1}{C_0} = \frac{C_2 + C_1}{C_1 C_2},$$

откуда найдем, что

$$C_0 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \quad (30)$$

т. е. общая емкость батареи из двух последовательно соединенных конденсаторов равна произведению их емкостей, разделенному на сумму этих емкостей.

Пример 19. Определить общую емкость двух последовательно соединенных конденсаторов, обладающих емкостями $C_1 = 0,6 \text{ мкф}$ и $C_2 = 0,3 \text{ мкф}$.
Решение. По формуле (30) находим

$$C_0 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{0,6 \cdot 0,3}{0,6 + 0,3} = 0,2 \text{ мкф.}$$

Если все n конденсаторов, соединенных последовательно, имеют одинаковые емкости, т. е.

$$C_1 = C_2 = C_3 = \dots = C_n = C,$$

то

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \dots + \frac{1}{C} = \frac{n}{C},$$

откуда находим, что общая емкость

$$C_0 = \frac{C}{n}, \quad (31)$$

т. е. общая емкость n последовательно соединенных конденсаторов, имеющих одинаковые емкости, меньше, чем емкость отдельного конденсатора, в n раз.

Пример 20. Соединены последовательно три конденсатора, из которых каждый обладает емкостью $C = 1,2 \text{ мкф}$. Определить общую емкость всей батареи конденсаторов.

Решение. По формуле (31) находим

$$C_0 = \frac{C}{n} = \frac{1,2}{3} = 0,4 \text{ мкф.}$$

Теперь посмотрим, как распределяется напряжение между отдельными последовательно соединенными конденсаторами.

Выше мы выяснили, что

$$C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_3 U_3 = q.$$

Отсюда находим, что

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}; \quad \frac{U_2}{U_3} = \frac{C_3}{C_2}; \quad \frac{U_3}{U_1} = \frac{C_1}{C_3}, \quad (32)$$

т. е. напряжение между последовательно соединенными конденсаторами распределяется обратно пропорционально их емкостям.

Пример 21. Определить, как распределится напряжение $U = 120$ в между тремя последовательно соединенными конденсаторами, имеющими емкости $C_1 = 0,3$ мкф, $C_2 = 0,2$ мкф и $C_3 = 0,12$ мкф, а также определить общую емкость и заряд всей батареи.

Решение. Определим общую емкость всех трех конденсаторов по формуле (29)

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{0,3} + \frac{1}{0,2} + \frac{1}{0,12} = \frac{100}{6},$$

откуда

$$C_0 = 0,06 \text{ мкф.}$$

Далее определим заряд всей батареи:

$$q = C_0 U = 0,06 \cdot 10^{-6} \cdot 120 = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ к.}$$

Напряжение на отдельных конденсаторах

$$U_1 = \frac{q}{C_1} = \frac{7,2 \cdot 10^{-6}}{0,3 \cdot 10^{-6}} = 24 \text{ в.}$$

$$U_2 = \frac{q}{C_2} = \frac{7,2 \cdot 10^{-6}}{0,2 \cdot 10^{-6}} = 36 \text{ в.}$$

$$U_3 = \frac{q}{C_3} = \frac{7,2 \cdot 10^{-6}}{0,12 \cdot 10^{-6}} = 60 \text{ в.}$$

Для проверки правильности решения сложим полученные напряжения:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 24 + 36 + 60 = 120 \text{ в.}$$

т. е. получим общее напряжение, равное заданному.

§ 30. СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

Батарея смешанно соединенных конденсаторов состоит из совокупности последовательного и параллельного соединения их.

На рис. 46 изображена схема смешанно соединенных четырех конденсаторов, из которых составлены две параллельно соединенные группы, имеющие по два последовательно соединенных конденсатора. Рассчитаем общую емкость данной батареи.

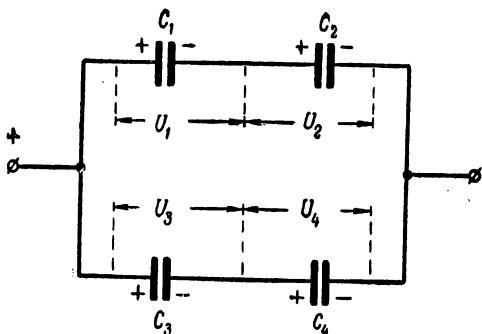


Рис. 46. Смешанное соединение конденсаторов

Вначале определим общие емкости отдельных групп, в которых конденсаторы соединены последовательно. По формуле (30) находим

$$C_I = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}; \quad C_{II} = \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4},$$

где C_I и C_{II} — общие емкости отдельных групп конденсаторов.

Группы соединены параллельно, а поэтому общая емкость всей батареи конденсаторов определится по формуле

$$C_0 = C_I + C_{II}.$$

Пример 22. Для некоторой электротехнической установки требуется конденсатор емкостью $C = 2$ мкф, рассчитанный на рабочее напряжение $U = 500$ в. Имеются конденсаторы емкостью $C = 2$ мкф, но рассчитанные на рабочее напряжение $U = 250$ в, а поэтому их использовать в данной установке, казалось бы, нельзя из-за возможности их пробоя при напряжении 500 в. Для использования этих конденсаторов в данной установке необходимо составить из них батарею, обладающую требуемыми стойкостью и напряжением.

Решение. Составим батарею из четырех конденсаторов согласно схеме, изображенной на рис. 46.

Емкости отдельных параллельных групп конденсаторов будут равны

$$C_I = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2 \cdot 2}{2 + 2} = 1 \text{ мкф};$$

$$C_{II} = \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4} = \frac{2 \cdot 2}{2 + 2} = 1 \text{ мкф}.$$

Общая емкость всей батареи

$$C_0 = C_I + C_{II} = 1 + 1 = 2 \text{ мкф}.$$

Напряжение распределится по отдельным конденсаторам поровну, так как емкости последних равны. Следовательно,

$$U_1 = U_2 = \frac{500}{2} = 250 \text{ в};$$

$$U_3 = U_4 = \frac{500}{2} = 250 \text{ в}.$$

§ 31. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Всякий конденсатор при заряде поглощает некоторое количество энергии от источника электрической энергии, заряжающего его. Эту энергию он накапливает в электрическом поле, U_C и накапливается в его диэлектрике.

Определим величину этой энергии для случая, когда заряжается плоский двухпластинчатый конденсатор. По мере заряда конденсатора растет его заряд q , получаемый от источника электрической энергии, и в соответствии с этим растет напряжение U_C на его обкладках. Как известно, между зарядом q конденсатора и напряжением U_C на его обкладках существует прямо пропорциональная зависимость:

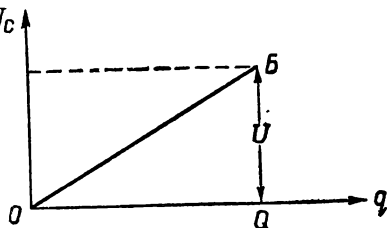


Рис. 47. Зависимость напряжения на обкладках конденсатора от величины заряда конденсатора

$$q = CU_C.$$

Эта зависимость показана на рис. 47 в виде прямой линии OB .

Допустим, что по окончании заряда конденсатор получил от источника электрической энергии заряд Q и в соответствии с этим напряжение на его зажимах стало равным U .

Работа, которую совершил источник электрической энергии по переносу зарядов на конденсаторе при заряде последнего, численно равна площади треугольника OQB (рис. 47), у которого основанием является Q — полный заряд конденсатора и высотой U — напряжение на конденсаторе при окончании его заряда. Площадь треугольника, как известно, равна половине произведения основания на высоту, а поэтому

$$A = \frac{UQ}{2}, \quad (33)$$

где Q — электрический заряд в кулонах;

U — напряжение в вольтах;

A — работа в джоулях.

Заменив в формуле (33) величину Q выражением

$$Q = CU,$$

получим

$$W = \frac{CU^2}{2}, \quad (34)$$

где C — емкость в фарадах;

U — напряжение в вольтах;

W — энергия в джоулях.

Пример 23. Конденсатор при напряжении на зажимах $U = 500$ в имеет заряд $q = 0,0001$ к. Определить энергию поля этого конденсатора.

Решение. По формуле (33) находим

$$W = \frac{UQ}{2} = \frac{500 \cdot 0,0001}{2} = 0,025 \text{ дж.}$$

Пример 24. Определить энергию электростатического поля конденсатора, если известно, что его емкость $C = 2$ мкф, а напряжение на его обкладках $U = 500$ в.

Решение. Применяя формулу (34), находим

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{2 \cdot 10^{-6} \cdot 500^2}{2} = 0,25 \text{ дж.}$$

Энергия электростатического поля распределена во всем объеме этого поля с некоторой конечной плотностью, величина которой пропорциональна квадрату напряженности поля, т. е.

$$W_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 E^2}{2}, \quad (35)$$

где W_0 — объемная плотность энергии поля в джоулях на кубический метр;

E — напряженность электростатического поля в вольтах на метр;

$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \left(\frac{\phi}{м} \right)$ — диэлектрическая проницаемость вакуума;

ϵ_r — относительная проницаемость среды, где распределено электростатическое поле.

Если известно распределение объемной плотности энергии поля, то можно определить энергию всего данного электростатического поля. Эта задача в общем случае решается с помощью приемов высшей математики, поэтому не может быть здесь рассмотрена. Мы ограничимся более простым, частным случаем, когда электростатическое поле однородно, т. е. в каждой его точке величина и направление вектора напряженности одинаковы. В этом случае объемная плотность энергии поля всюду одинакова, а поэтому общая энергия всего поля определяется произведением объемной плотности энергии на объем пространства, занимаемого всем полем:

$$W = W_0 V, \quad (36)$$

где W — энергия электростатического поля в джоулях;

W_0 — объемная плотность энергии в джоулях на кубический метр;

V — объем в кубических метрах.

Пример 25. Требуется определить энергию, запасенную в электростатическом поле плоского двухпластинчатого конденсатора, если площадь каждой

из его обкладок $S = 0,004$ кв. м, расстояние между обкладками $d = 0,001$ м, относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\epsilon_r = 5$ и напряжение на обкладках $U = 120$ в.

Решение. Так как электростатическое поле плоского конденсатора в данном случае можно считать однородным, то напряженность этого поля будет равна

$$E = \frac{U}{d} = \frac{120}{0,001} = 120\,000 \text{ в/м.}$$

Объемная плотность энергии в поле равна

$$W_0 = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 E^2}{2} = \frac{5 \cdot 120\,000^2}{2 \cdot 4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} = 0,318 \text{ дж/м}^3.$$

Объем, занимаемый электростатическим полем, равен

$$V = Sd = 0,004 \cdot 0,001 = 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Энергия, запасенная во всем объеме электростатического поля, равна

$$W = W_0 V = 0,318 \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 1,272 \cdot 10^{-6} \text{ дж.}$$

§ 32. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Если напряжение на зажимах конденсатора увеличивается, то в соответствии с этим увеличивается и напряженность электростатического поля в его диэлектрике. Опыт показывает, что при достижении некоторой, определенной для каждого диэлектрика, величины напряженности электростатического поля диэлектрик теряет свои изолирующие свойства и в нем происходит **электрический пробой**.

Физический процесс электрического пробоя газовых и твердых диэлектриков протекает различно.

В каждом газе при нормальном его состоянии всегда имеется некоторое количество свободных электронов, а также положительных и отрицательных ионов. Но так как их мало, то при относительно слабых электрических полях ток проводимости в газе настолько мал, что практически им можно пренебречь. Однако электрическое состояние газового диэлектрика заметно изменяется по мере увеличения напряженности электрического поля в нем. Скорость движения свободных электрических зарядов при этом растет, а следовательно, увеличивается и кинетическая энергия зарядов. Когда напряженность электрического поля достигает некоторой величины, кинетическая энергия свободных зарядов возрастает настолько, что при столкновении их с молекулами возникает **явление ударной ионизации** этих молекул. Этот процесс развивается в газах весьма интенсивно, нося лавинообразный характер, так как всякий возникший в процессе ионизации свободный заряд сам принимает непосредственное участие в дальнейшей ионизации газа. В конечном итоге количе-

ственные изменения свободных зарядов в газе приводят к резкому качественному изменению его состояния, в результате чего возникает электрический пробой газа — через диэлектрик проходит относительно большой ток проводимости в виде электрической искры. Пример такого мощного электрического разряда в газах — грозовой разряд в воздухе (молния), сопровождаемый громом.

Процесс пробоя твердых диэлектриков протекает несколько иначе по сравнению с пробоем в газах. Так как длина свободного пробега электронов между атомами и молекулами твердого диэлектрика относительно мала, то они не могут развивать скорость движения до такого предела, при котором могла бы возникнуть ударная ионизация.

Пробой твердого диэлектрика зависит главным образом от тепловых процессов, которые развиваются в нем при продолжительном действии электрического поля. Если твердый диэлектрик имеет относительно большую толщину, то потери энергии в нем могут вызвать значительный нагрев его. С ростом же температуры диэлектрика его сопротивление падает из-за отрицательного температурного коэффициента. В результате начинает быстро расти ток проводимости в диэлектрике, что еще более способствует повышению его температуры. Наконец, температура твердого диэлектрика может достигнуть такой величины, при которой начинается качественное изменение самого диэлектрика, приводящее к уменьшению его электрической прочности, а следовательно, и к пробую. Пробой твердых диэлектриков, возникший в результате теплового действия, носит название **теплового пробоя**.

Таблица 12

Электрическая прочность материалов

Наименование диэлектрика	Электрическая прочность, <i>кв/см</i>
Бумага кабельная сухая	60—90
Бумага, пропитанная маслом	100—250
Воздух	30
Масло трансформаторное	50—180
Миканит	150—300
Мрамор	35—55
Парафин	150—300
Электрокартон сухой	80—100
Электрокартон, пропитанный маслом	120—170
Слюда мусковитая	1200—2000
Слюда флогопит	600—1250
Стекло	100—400
Фибра	40—110
Фарфор	180—250
Шифер	15—30
Эбонит	80—100

Если толщина твердого диэлектрика в конденсаторе мала, то возможность теплового пробоя диэлектрика уменьшается благодаря лучшей теплоотдаче конденсатора. Однако в тонкослойном твердом диэлектрике не исключена возможность ионизационного пробоя.

Величина напряженности электрического поля, при которой наступает пробой диэлектрика, называется электрической прочностью (крепостью) диэлектрика.

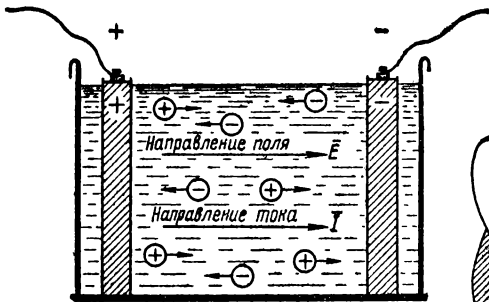
В табл. 12 приведены данные электрической прочности наиболее употребительных в электротехнике диэлектриков.

ГЛАВА VI
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 33. НАПРАВЛЕНИЕ И ВЕЛИЧИНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

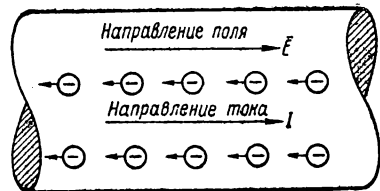
Электрическим током называется направленное, упорядоченное движение электрических зарядов в электрическом поле.

При изучении законов электрического тока перед нами неизбежно встанет вопрос, какое же имеет направление ток в проводниках, так как потоки разноименных электрических зарядов в электрическом поле обычно протекают в диаметрально противоположных направлениях.



- ⊕ Положительный ион
- ⊖ Отрицательный ион

Рис. 48. Направление электрического поля \vec{E} , тока I и движения положительных и отрицательных ионов в электролите



- ⊖ Направление движения свободного электрона

Рис. 49. Направление поля \vec{E} , тока I и движения свободных электронов

Условно принято считать, что электрический ток в электрическом поле имеет направление от точек с большими потенциалами к точкам с меньшими потенциалами. Это значит, что направление электрического тока всегда совпадает с направлением движения положительных электрических зарядов, например с направлением положительных ионов в электролитах и газах (рис. 48). Там же, где электрический ток создается движением

только потока отрицательно заряженных частиц, например потока свободных электронов в металлах, за направление электрического тока принимают направление, противоположное движению электронов (рис. 49). Этому общепринятому условному направлению движения электрического тока мы и будем придерживаться в дальнейшем.

Чем больше напряженность электрического поля в проводнике, тем больше сила, действующая на электрические заряды в нем, и тем с большей скоростью они перемещаются направленно в этом поле. А это значит, что с ростом напряженности поля в проводнике будет увеличиваться количество электричества, протекающего через поперечное сечение проводника в единицу времени.

Мерой интенсивности движения электрических зарядов в проводниках является величина тока, или просто ток (I, i). Величина тока — это количество электрических зарядов (электричества), протекающих через поперечное сечение проводника в единицу времени.

Вместо термина «ток» («величина тока») часто применяется термин «сила тока». Однако последний нельзя назвать удачным, так как сила тока не есть какая-либо сила в буквальном смысле этого слова, а только интенсивность движения электрических зарядов в проводнике, количество электричества, проходящего за единицу времени через площадь поперечного сечения проводника.

Если при равномерном движении электрических зарядов по проводнику за время t протекло количество электричества q , то ток в проводнике можно определить по формуле

$$I = \frac{q}{t}. \quad (37)$$

В системе единиц МКСА за единицу тока принимается один ампер (a, A).

В проводнике ток равен одному амперу, если через площадь поперечного сечения его за одну секунду протекает один кулон электричества:

$$1 \text{ ампер} = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ секунда}}.$$

В табл. 13 приведены единицы измерения тока с указанием их обозначений и соотношений с основной единицей.

Следовательно, если в формуле (37) количество электричества выразить в кулонах, время t — в секундах, то ток I будет выражен в амперах.

Единицы измерения тока в системе единиц МКСА

Наименование величины и ее обозначение	Название единицы	Обозначение		Соотношение с основной единицей	
		русское	междуна- родное		
Ток I	{	ампер	a	A	—
		миллиампер	ma	mA	$10^{-3} a$
		микроампер	mka	μA	$10^{-6} a$

Пример 26. Через потребитель при неизменном токе в течение $t = 5$ мин. протекло количество электричества $q = 4,5$ к. Определить ток I в потребителе.

Решение. По формуле (37) находим

$$I = \frac{q}{t} = \frac{4,5}{5 \cdot 60} = 0,015 \text{ а.}$$

Зная ток I в проводнике, можно определить количество электричества q , прошедшего через поперечное сечение проводника за время t . Из формулы (37) непосредственно следует, что

$$q = It, \quad (38)$$

где q — количество электричества в кулонах;
 I — ток в амперах;
 t — время в секундах.

Пример 27. Какое количество электричества прошло через электрическую лампу за время $t = 0,5$ часа, если ток в лампе равен $I = 0,6$ а.

Решение. По формуле (38) находим

$$q = It = 0,6 \cdot 0,5 \cdot 60 \cdot 60 = 1080 \text{ к.}$$

В тех случаях когда приходится иметь дело с большими токами, количество электричества измеряется более крупной единицей, называемой ампер-часом ($a \cdot ч$, Ah).

$$1 \text{ ампер-час} = 3600 \text{ кулонам.}$$

В электротехнике приходится иметь дело с токами от микроампера до десятков тысяч ампер. Для питания цепей аппаратуры связи применяются токи, измеряемые миллиамперами или в некоторых случаях микроамперами, а поэтому электротехнику связи относят к технике слабых токов.

Электротехнические устройства, в которых токи измеряются единицами, десятками, сотнями и т. д. ампер, относятся к технике сильных токов. Электрические станции, электросиловые установки, электрическое освещение и т. д. относятся к технике сильных токов.

Для измерения тока в электрической цепи служат приборы, называемые амперметрами (рис. 50).

Амперметр включается своими зажимами в цепь так, чтобы через него проходил весь измеряемый ток. На рис. 51 показана

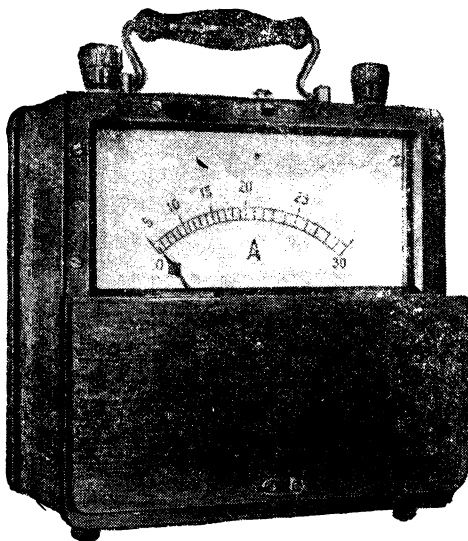


Рис. 50. Внешний вид переносного амперметра

электрическая цепь, состоящая из батареи гальванических элементов 1, амперметра A и некоторого потребителя электрической энергии 2. С принципом действия и устройством амперметра мы познакомимся подробно в главе об измерительных приборах.

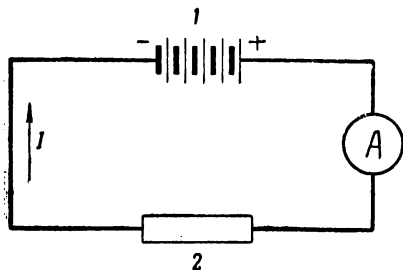


Рис. 51. Схема включения амперметра в электрическую цепь

§ 34. ПЛОТНОСТЬ ТОКА

В электротехнике очень часто бывает важно знать не только величину тока в проводнике, но и плотность тока, так как плотность тока является мерой допустимой электрической нагрузки проводов.

Плотностью тока (j , δ) называется ток, приходящийся на единицу площади поперечного сечения проводника:

$$j = \frac{I}{S}, \quad (39)$$

где j — плотность тока в проводнике;

I — ток в проводнике;

S — площадь поперечного сечения проводника.

Если в формуле (39) ток I выразить в амперах, а площадь поперечного сечения S — в квадратных метрах, то плотность тока j будет выражена в амперах на квадратный метр $\left(\frac{a}{m^2}, \frac{A}{m^2}\right)$.

В тех случаях когда ток протекает по линейному проводнику, поперечное сечение которого обычно измеряется в квадратных

миллиметрах, плотность тока, измеренная в нем, будет в амперах на квадратный миллиметр $\left(\frac{a}{\text{мм}^2}, \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}\right)$.

В табл. 14 приведены единицы измерения плотности тока, их условные обозначения и соотношение их с основной единицей.

Таблица 14

Единицы измерения плотности тока в системе единиц МКСА

Наименование величины и ее обозначение	Название единицы	Обозначение		Соотношение с основной единицей
		русское	международное	
Плотность тока j, δ	ампер на квадратный метр	$\frac{a}{\text{м}^2}$	$\frac{\text{А}}{\text{м}^2}$	—
	ампер на квадратный сантиметр	$\frac{a}{\text{см}^2}$	$\frac{\text{А}}{\text{см}^2}$	$10^4 \frac{a}{\text{м}^2}$
	ампер на квадратный миллиметр	$\frac{a}{\text{мм}^2}$	$\frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$	$10^6 \frac{a}{\text{м}^2}$

Пример 28. Через катушку, на которую намотан цилиндрический провод диаметром $d = 2$ мм, проходит ток $I = 12,56$ а. Определить плотность тока в проводе катушки. Толщиной изоляции провода на катушке можно пренебречь.

Решение. Вначале определим площадь S поперечного сечения провода на катушке. Согласно известной геометрической формуле

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{ мм}^2.$$

Далее по формуле (39) находим плотность тока в проводе:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{12,56}{3,14} = 4 \frac{a}{\text{мм}^2}.$$

§ 35. ПОСТОЯННЫЙ ТОК И СТАЦИОНАРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Постоянным электрическим током называется такой ток, который с течением времени не изменяется по своей величине.

На рис. 52 изображен график постоянного тока. Здесь по горизонтальной оси отложен масштаб времени t , а по вертикальной — масштаб тока I . Как видно из рис. 52, график постоянного тока представляет собой прямую линию, параллельную горизонтальной оси (оси времени). Величина постоянного тока I для любого момента времени сохраняется неизменной, и в соответствии с этим все перпендикуляры, опущенные из любой точки графика тока I на горизонтальную ось (ось времени), равны.

При постоянном токе через каждое поперечное сечение проводника в единицу времени протекает одинаковое количество электричества (электрических зарядов). Это значит, что в каж-

дой точке проводника, по которому протекает постоянный ток, одни элементарные электрические заряды непрерывно сменяются другими, совершенно одинаковыми электрическими зарядами. Следовательно, несмотря на непрерывное перемещение электрических зарядов вдоль проводника, общее пространственное их расположение внутри проводника как бы остается неизменным во времени, или стационарным.

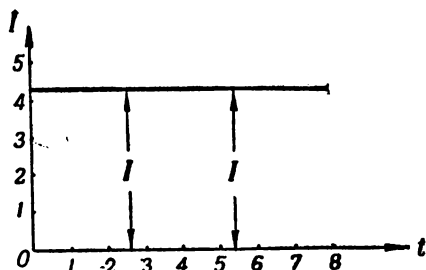


Рис. 52. График постоянного тока

Электрическое поле, с помощью которого создается и поддерживается постоянный ток в проводнике и в соответствии с этим стационарное распределение в нем электрических зарядов, называется стационарным (неизменным во времени) электрическим полем.

Стационарное электрическое поле существенно отличается от поля электростатического. Если металлический проводник находится во внешнем электростатическом поле ($E_{\text{внеш}}$), то электрические заряды распределены в нем так (рис. 53), что создаваемое ими собственное внутреннее поле ($E_{\text{внут}}$) полностью компенсирует внешнее поле ($\vec{E}_{\text{внеш}} = -\vec{E}_{\text{внут}}$). В силу этого напряженность результирующего электрического поля внутри проводника равна нулю ($E_{\text{рез}} = 0$). Но если это так, то разность потенциалов двух любых точек внутри проводника, а также и на поверхности его тождественно равна нулю ($\varphi_N - \varphi_M \equiv 0$). Это значит, что поверхность проводника, находящегося в электростатическом поле, — равнопотенциальная поверхность. Перераспределение зарядов в проводнике, находящемся в электростатическом поле, возможно только в том случае, если начнет изменяться внешнее электростатическое поле, т. е. если оно превратится в переменное во времени электрическое поле.

Совершенно иная картина наблюдается внутри металлического проводника, если в нем существует стационарное электри-

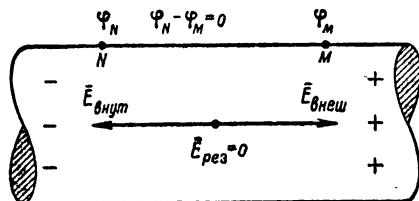


Рис. 53. Статическое распределение зарядов в металлическом проводнике

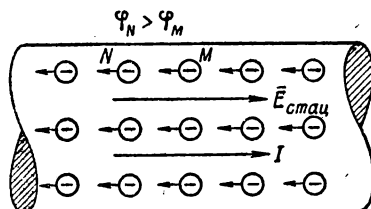


Рис. 54. Стационарное распределение электрических зарядов в металлическом проводнике

ческое поле (рис. 54). В этом случае напряженность электрического поля в любой точке проводника отлична от нуля ($E \neq 0$); поверхность проводника уже не является равнопотенциальной ($\varphi_N \neq \varphi_M$); потенциалы поля внутри проводника и на поверхности его убывают в направлении тока I (в направлении поля); свободные электроны непрерывным и равномерным потоком движутся навстречу полю, но в то же время пространственное распределение их внутри проводника стационарно (неизменно во времени). Электрические заряды в стационарном электрическом поле нигде не накапливаются и нигде не исчезают, так как при всяком пространственном перераспределении зарядов неизбежно должно было бы измениться само стационарное поле и соответственно ток перестал бы быть постоянным во времени.

Но если для стационарности поля и тока требуется, чтобы электрические заряды нигде не накапливались и нигде не терялись, а перемещались непрерывным и равномерным потоком вдоль проводников, необходимо, чтобы эти проводники совместно образовали замкнутый на себя контур. В этом случае будет достигнуто непрерывное круговое равномерное движение электрических зарядов вдоль всего замкнутого контура. Итак, **постоянный электрический ток может существовать только в замкнутом на себя контуре, состоящем из совокупности проводников электричества, в котором действует стационарное электрическое поле.**

§ 36. СТОРОННИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

Сравнивая электростатическое и стационарное электрические поля, необходимо указать на еще одну существенную разницу между ними.

Для поддержания постоянства электростатического поля нет необходимости расходовать энергию, так как в этом случае электрические заряды находятся в относительном покое.

Наоборот, для поддержания постоянства стационарного электрического поля необходима непрерывная затрата энергии. Дело в том, что стационарное поле существует только при постоянном токе в проводниках, т. е. при условии, что вдоль этих проводников непрерывным потоком движутся электрические заряды. Силы стационарного поля, перемещая эти заряды, совершают работу, которая в конечном итоге преобразуется в другие виды энергии, например тепловую. Следовательно, стационарное электрическое поле, поддерживая постоянный электрический ток в проводниках, непрерывно расходует свою энергию, преобразуя ее с помощью тока в иные виды энергии.

Естественно, для поддержания стационарного электрического поля необходимо непрерывное возмещение потерь его энергии за счет каких-либо иных видов энергии, например механической,

химической и т. д. Это осуществляется с помощью источников электрической энергии, в которых механическая (в электрических машинах) или химическая (в аккумуляторах и гальванических элементах) энергия преобразуется в энергию электрического поля.

Электрические поля, создаваемые источниками электрической энергии, существенно отличаются от электростатического поля. Они обычно называются **сторонними электрическими полями**. Термин «сторонние» здесь подчеркивает то, что эти поля по своей природе отличны от поля электростатического.

Сторонние электрические поля могут быть созданы в результате самых разнообразных физических явлений. Если, например,

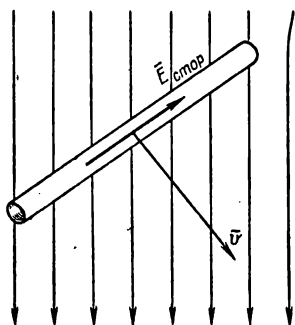


Рис. 55. В металлическом проводнике, пересекающем при своем движении магнитные линии, возникает стороннее электрическое поле

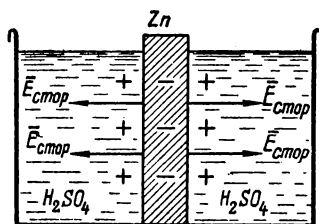


Рис. 56. На границе соприкосновения цинка с раствором серной кислоты возникает стороннее электрическое поле

металлическую проволоку перемещать в магнитном поле так, чтобы она пересекала магнитные линии, то внутри этой проволоки возникнет стороннее электрическое поле (рис. 55). На этом принципе преобразования механической энергии движения проводника в магнитном поле в электрическую энергию стороннего электрического поля основано действие электрических машин.

Стороннее электрическое поле возникает также в месте соприкосновения металлов с растворами солей и кислот, например цинка и раствора серной кислоты (рис. 56). В этом случае стороннее поле получает энергию в результате преобразования химической энергии растворимого в электролите (растворе серной кислоты) цинка. На принципе преобразования химической энергии в электрическую энергию стороннего электрического поля основано действие гальванического элемента.

Стороннее поле получается при подогреве места спая двух разнородных металлов, например меди и висмута. В этом случае

стороннее поле получает энергию в результате преобразования тепловой энергии. На принципе преобразования тепловой энергии в энергию стороннего поля основана работа термоэлементов.

Здесь мы не имеем возможности подробно останавливаться на описании физической сущности преобразования различных видов энергии в энергию сторонних электрических полей. Это будет сделано впоследствии, при описании принципа действия источников электрической энергии.

Силы, с помощью которых осуществляется действие сил стороннего поля на электрические заряды, помещенные в нем, называются **сторонними силами**. Здесь термин «сторонние» подчеркивает то, что эти силы не электростатического происхождения. Природа их во многих случаях еще не вполне выяснена.

Всякое стороннее электрическое поле, как и поле электростатическое, характеризуется напряженностью в каждой его точке.

Напряженность стороннего электрического поля в данной его точке численно равна силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в эту точку, и совпадает с направлением действия этой силы:

$$E_{\text{стор}} = \frac{F_{\text{стор}}}{q},$$

где $E_{\text{стор}}$ — напряженность стороннего электрического поля в вольтах на метр;

$F_{\text{стор}}$ — механическая сила в ньютонах, действующая на электрический заряд q , помещенный в данную точку поля;

q — заряд в кулонах.

Итак, для существования постоянного тока в системе проводников и соответственно стационарного электрического поля, создающего этот ток, необходимо, чтобы эта система образовала замкнутый на себя контур. Одним из необходимых звеньев этого контура должен быть источник электрической энергии, в котором механическая или химическая энергия преобразуется в энергию их стороннего электрического поля. Стороннее же электрическое поле передает свою энергию стационарному электрическому полю, которое в свою очередь посредством электрического тока преобразует ее в какие-либо иные виды энергии.

В дальнейшем для краткости записи будем называть сторонние электрические поля просто электрическими полями, оставляя за электрическим полем относительно неподвижных электрических зарядов название электростатическое поле.

ГЛАВА VII

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА И НАПРЯЖЕНИЕ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

§ 37. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Источники электрической энергии постоянного тока подразделяются на две основные группы: 1) электрические машины (генераторы) постоянного тока, преобразующие механическую энергию в электрическую, и 2) химические источники электрической энергии (аккумуляторы и гальванические элементы), преобразующие химическую энергию в электрическую.

Независимо от принципа действия источника электрической энергии постоянного тока каждый из них создает стороннее электрическое поле. В электрических машинах постоянного тока это поле создается в металлических проводниках якоря, вращающегося в магнитном поле, а в аккумуляторах и гальванических элементах — в месте соприкосновения электродов с электролитом (растворами солей или кислот) при их химическом взаимодействии.

Стороннее электрическое поле, имеющееся в источнике электрической энергии постоянного тока, непрерывно действует на электрические заряды проводников, образующих вместе с ним замкнутую цепь, и создает в ней постоянный электрический ток.

Перемещая электрические заряды по замкнутой цепи, силы стороннего электрического поля преодолевают сопротивление противодействующих сил, например вещественных частиц проводников. Это приводит к тому, что силы стороннего электрического поля совершают работу за счет энергии этого поля. По мере расхода энергии стороннее электрическое поле пополняет ее за счет механической или химической энергии.

В результате работы сил стороннего электрического поля энергия этого поля переходит в цепи в какие-либо иные виды энергии, например тепловую в металлических проводниках, тепловую и химическую в электролитах, тепловую и световую в электрических лампочках и т. д.

Выражение «работа сил стороннего электрического поля» источника электрической энергии ради краткости обычно заменяют выражением «работа источника электрической энергии».

Если известна работа, совершаемая источником электрической энергии при перемещении единичного электрического заряда по всей замкнутой электрической цепи, то легко определить работу, совершаемую им при переносе некоторого электрического заряда q по этой цепи, так как величина работы пропорциональна величине заряда.

Величина, численно равная работе, совершаемой источником электрической энергии при переносе единицы положительного заряда по всей замкнутой цепи, называется электродвижущей силой E .

Следовательно, если источник электрической энергии при переносе заряда q по всей замкнутой цепи совершил работу A , то его электродвижущая сила E равна

$$E = \frac{A}{q}. \quad (40)$$

В системе единиц МКСА за единицу измерения электродвижущей силы принимается один вольт (v , V).

Электродвижущая сила источника электрической энергии равна одному вольту, если при перемещении одного кулона электричества по всей замкнутой цепи им была совершена работа, равная одному джоулю:

$$1 \text{ вольт} = \frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ кулон}}. \quad (41)$$

Если, например, электродвижущая сила какого-либо источника электрической энергии $E = 125 \text{ в}$, то это надо понимать так, что источник электрической энергии, перемещая один кулон электричества по всей замкнутой цепи, совершит работу $A = 125$ джоулям, так как

$$E = \frac{A}{q} = \frac{125 \text{ джоулей}}{1 \text{ кулон}} = 125 \text{ вольт}.$$

Таким образом, зная электродвижущую силу E источника электрической энергии и количество электричества q , перенесенное им по замкнутой цепи, можно определить работу, совершенную источником.

Из формулы (40) следует, что

$$A = Eq, \quad (42)$$

т. е. работа источника электрической энергии при переносе электрического заряда по всей замкнутой цепи равна произведению величины электродвижущей силы E его на величину переносимого электрического заряда q .

Пример 29. Электродвижущая сила гальванического элемента $E = 1$ в. Определить, какую работу совершит этот элемент, перенося количество электричества $q = 8$ к по всей замкнутой цепи.

Решение. По формуле (42) находим

$$A = Eq = 1 \cdot 8 = 8 \text{ дж.}$$

§ 38. НАПРЯЖЕНИЕ НА УЧАСТКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Если источник электрической энергии переносит электрический заряд q по всей замкнутой цепи, то он совершает некоторую работу A . Часть этой работы A_0 он совершает при переносе заряда q по внутреннему участку цепи (участок внутри самого источника электрической энергии), а другую часть A_1 — при переносе заряда q по внешнему участку цепи (вне источника).

Следовательно,

$$A = A_0 + A_1, \quad (43)$$

т. е. работа A , совершаемая источником электрической энергии при переносе электрического заряда q по всей замкнутой цепи, равна сумме работ, совершаемых им при переносе этого заряда по внутреннему и внешнему участкам этой цепи.

Разделив левую и правые части равенства (43) на величину заряда q , получим работу источника электрической энергии, отнесенную к единичному заряду:

$$\frac{A}{q} = \frac{A_0}{q} + \frac{A_1}{q}. \quad (44)$$

Но, как известно, работа источника электрической энергии, совершаемая им при переносе единичного заряда по всей замкнутой цепи, численно равна его электродвижущей силе, т. е.

$$E = \frac{A}{q},$$

где E — электродвижущая сила источника электрической энергии.

Величина $\frac{A_0}{q}$, численно равная работе, совершаемой источником электрической энергии при переносе единичного заряда по внутреннему участку цепи, называется падением напряжения (напряжением) на внутреннем участке цепи, т. е.

$$U_0 = \frac{A_0}{q},$$

где U_0 — падение напряжения на внутреннем участке цепи.

Величина $\frac{A_1}{q}$, численно равная работе, совершаемой источником электрической энергии при переносе единичного заряда по внешнему участку цепи, называется падением напряжения (напряжением) на внешнем участке цепи, т. е.

$$U_1 = \frac{A_1}{q_1},$$

где U_1 — падение напряжения на внешнем участке цепи.

Следовательно, равенству (44) можно придать такой вид:

$$E = U_0 + U_1, \quad (45)$$

т. е. электродвижущая сила источника электрической энергии, создающего ток в электрической цепи, равняется сумме падений напряжения на внутреннем и внешнем участках этой цепи.

Из равенства (45) следует, что

$$U_1 = E - U_0,$$

т. е. падение напряжения на внешнем участке цепи меньше электродвижущей силы источника электрической энергии на величину падения напряжения на внутреннем участке цепи.

Следовательно, чем больше падение напряжения внутри источника электрической энергии, тем меньше при всех прочих равных условиях падение напряжения на внешнем участке цепи, т. е. напряжение на зажимах источника электрической энергии.

Так как падение напряжения имеет одинаковую размерность с электродвижущей силой, т. е. выражается в джоулях на кулон, или, иначе, в вольтах, то за единицу измерения падения напряжения (напряжения) принят один вольт.

Напряжение на зажимах источника электрической энергии (падение напряжения во внешнем участке цепи) равно одному вольту, если источник электрической энергии совершает работу, равную одному джоулю, при переносе электрического заряда в один кулон по внешнему участку цепи.

Пример 30. Источник электрической энергии, перенося электрический заряд $q = 5$ к по замкнутой цепи, совершает работу, равную $A = 120$ дж, а при переносе по внутреннему участку — работу $A_0 = 10$ дж. Требуется определить электродвижущую силу источника электрической энергии, падение напряжения на внутреннем и внешнем участках цепи и работу, совершаемую источником электрической энергии во внешнем участке цепи.

Решение. Электродвижущая сила источника электрической энергии равна

$$E = \frac{A}{q} = \frac{120}{5} = 24 \text{ в.}$$

Падение напряжения внутри источника электрической энергии

$$U_0 = \frac{A_0}{q} = \frac{10}{5} = 2 \text{ в.}$$

Падение напряжения во внешнем участке цепи

$$U_1 = E - U_0 = 24 - 2 = 22 \text{ в.}$$

Работа, совершаемая источником электрической энергии во внешнем участке цепи, равна

$$A_1 = A - A_0 = 120 - 10 = 110 \text{ дж.}$$

Если цепь, состоящую из источника электрической энергии и какого-либо внешнего сопротивления, разомкнуть, то ток в цепи станет равным нулю. В этом случае источник электрической энергии, как говорят, находится в режиме холостого хода. Но если при режиме холостого хода источника электрической энергии ток в цепи равен нулю, то внутри источника электрической энергии падение напряжения также равно нулю ($U_0 = 0$). Следовательно, в этом случае напряжение U_1 на зажимах источника электрической энергии будет равно

$$U_{x,x} = E - U_0 = E, \quad (46)$$

т. е. напряжение $U_{x,x}$ на зажимах источника электрической энергии при холостом ходе равно его электродвижущей силе E .

Если зажимы источника электрической энергии замкнуть таким проводником, сопротивление которого практически равно нулю, то работа источника электрической энергии при переносе электрических зарядов по внешнему участку цепи будет равна нулю. Такой режим называется режимом короткого замыкания.

Следовательно, падение напряжения на внешнем участке цепи при коротком замыкании источника электрической энергии равно нулю:

$$U_{к.з} = \frac{A_1}{q} = \frac{0}{q} = 0,$$

где $U_{к.з}$ — напряжение короткого замыкания.

В соответствии с этим

$$E = U_0 + U_1 = U_0 + 0 = U_0,$$

т. е. при коротком замыкании источника электрической энергии его электродвижущая сила E целиком расходуется во внутреннем участке цепи.

Для измерения напряжения на участках электрической цепи применяется прибор, называемый вольтметром. На рис. 57 показан внешний вид одного из переносных вольтметров, а на рис. 58 показана схема включения вольтметра для измерения напряжения на участке цепи с сопротивлением R . Надо помнить, что

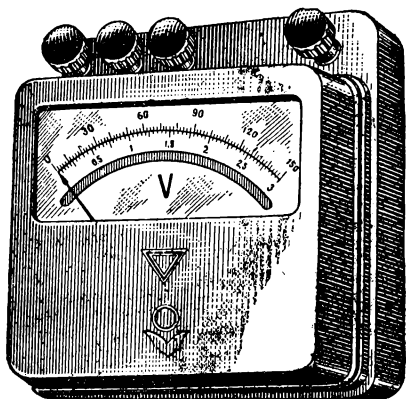


Рис. 57. Внешний вид переносного вольтметра

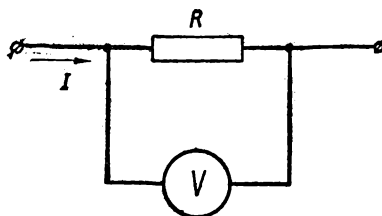


Рис. 58. Схема включения вольтметра в электрическую цепь

вольтметр своими зажимами всегда присоединяется к тем точкам цепи, между которыми он должен измерить падение напряжения.

ГЛАВА VIII

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

§ 39. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

Если в проводнике проходит электрический ток, то это значит, что в нем существует электрическое поле и направленное движение потока свободных электронов (в металлических проводниках) или потока ионов (в электролитах).

Свободные электроны и ионы, перемещаясь направленно (упорядоченно) вдоль проводников, на пути своего движения «сталкиваются» с атомами, молекулами вещества и при этом отдают им часть своей энергии. Эти «столкновения» электронов и ионов с атомами и молекулами приводят к тому, что первые из них испытывают как бы некоторое противодействие (сопротивление) своему движению. Чем больше это противодействие, тем меньше скорость направленного, упорядоченного движения электронов и ионов в проводниках и тем, следовательно, меньше будет ток в проводниках при прочих равных условиях.

Противодействие, которое оказывает проводник проходящему через него электрическому току, называется **электрическим сопротивлением** проводника или просто **сопротивлением** (R, r).

Опытом установлено, что сопротивление проводника зависит от его геометрических размеров, от материала и ряда физических условий.

В системе единиц МКСА за единицу сопротивления принимается один ом ($ом, \Omega$).

Проводник обладает сопротивлением в один ом, если при напряжении на его концах, равном одному вольту, в нем устанавливается ток, равный одному амперу:

$$1 \text{ ом} = \frac{1 \text{ вольт}}{1 \text{ ампер}}. \quad (47)$$

В табл. 15 приведены единицы измерения сопротивлений с указанием их условных обозначений.

Единицы измерения сопротивлений проводников в системе единиц МКСА

Наименование величины и ее обозначение	Название единицы	Обозначение		Соотношение с основной единицей
		русское	международное	
Сопротивление R, r {	ом мегом	<i>ом</i> <i>Мом</i>	Ω M Ω	— 10^6 ом

В качестве эталона, обладающего сопротивлением в один ом, принимают сопротивление столбика ртути высотой 106,3 см и площадью поперечного сечения 1 мм² при 0° Ц, что соответствует массе ртути в 14,45 г.

§ 40. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ИХ РАЗМЕРОВ И МАТЕРИАЛА

Сопротивление проводника прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально площади поперечного сечения.

Математически эта зависимость выражается следующей формулой:

$$R = \frac{\rho l}{S}, \quad (48)$$

где R — сопротивление проводника;

l — длина проводника;

S — площадь поперечного сечения проводника;

ρ — коэффициент пропорциональности, называемый удельным сопротивлением проводника.

Исходя из формулы (48), определим размерность удельного сопротивления ρ :

$$\rho = \frac{RS}{l} \left(\frac{\text{ом} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} \right) = \frac{RS}{l} \text{ (ом} \cdot \text{метр)}, \quad (49)$$

т. е. размерность удельного сопротивления в системе единиц МКСА выражается в ом-метрах.

В соответствии с этим за единицу измерения удельного сопротивления в системе единиц МКСА принимается 1 ом-метр (1 ом·м, Ωm).

Проводник обладает удельным сопротивлением в 1 ом-метр, если при длине его, равной одному метру, и площади поперечного сечения в один квадратный метр он имеет сопротивление один ом:

$$1 \text{ ом} \cdot \text{м} = \frac{1 \text{ ом} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}}$$

В тех случаях когда длину проводника берут в сантиметрах, а площадь поперечного сечения — в квадратных сантиметрах, удельное сопротивление выражают в ом-сантиметрах.

Удельное сопротивление проводника равно одному ом-сантиметру, если при длине его, равной одному сантиметру, и площади поперечного сечения в один квадратный сантиметр сопротивление его равно одному ому:

$$1 \text{ ом} \cdot \text{см} = \frac{1 \text{ ом} \cdot 1 \text{ см}^2}{1 \text{ см}}$$

При расчете сопротивлений проводов обычно длину их измеряют в метрах, а площадь поперечного сечения — в квадратных миллиметрах. В соответствии с этим удельное сопротивление проводов выражают в $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Удельное сопротивление провода равно $1 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, если при длине провода в один метр и площади поперечного сечения в один квадратный миллиметр сопротивление его равно одному ому.

В табл. 16 приведены единицы измерения удельных сопротивлений с указанием их обозначений и соотношений с основной единицей.

Таблица 16

Единицы измерения удельного сопротивления в системе единиц МКСа

Наименование величины и ее обозначение	Название единицы	Обозначение		Соотношение с основной единицей
		русское	международное	
Удельное сопротивление ρ	ом-метр	$\text{ом} \cdot \text{м}$	$\Omega \text{м}$	—
	ом-сантиметр	$\text{ом} \cdot \text{см}$	$\Omega \text{см}$	$10^{-2} \text{ ом} \cdot \text{м}$
	ом-миллиметр	$\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{мм}}$	$\frac{\Omega \text{мм}^2}{\text{мм}}$	$10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$
	квадратный на метр	$\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	$\frac{\Omega \text{мм}^2}{\text{м}}$	$10^{-6} \text{ ом} \cdot \text{м}$

В табл. 17 приведены удельные сопротивления некоторых наиболее употребительных проводников первого рода при 20° Ц.

В табл. 18 приведены удельные сопротивления электролитов при 10° Ц.

Зная удельное сопротивление и размеры проводника, можно, пользуясь формулой (48), определить его сопротивление.

Пример 31. Определить сопротивление медного провода длиной $l = 300 \text{ м}$, площадью поперечного сечения $S = 6 \text{ мм}^2$ и удельным сопротивлением $\rho = 0,0175 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Таблица 17

Удельные сопротивления важнейших проводников первого рода

Наименование материала	Удельное сопротивление при 20° Ц $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Состав сплава, %
Серебро	0,0147—0,0175	
Медь	0,0154—0,0175	
Алюминий	0,0262—0,0278	
Вольфрам	0,049—0,0612	
Цинк	0,059—0,062	
Никель	0,07—0,138	
Сталь	0,0987—0,14	
Свинец	0,206—0,221	
Ртуть	0,948—0,9569	
Висмут	1,1428—1,39	
Латунь	0,02—0,06	
Нейзильбер	0,3	Cu 60,16%; Zn 25,37%; Ni 14,03%; Fe 0,3%
Никелин	0,42	Cu 61,63%; Zn 19,67%; Ni 18,46%; Fe 0,24%
Манганин	0,374	Cu 87,24%; Mn 10,26%; Ni 1,77%; Fe 0,52%
Константан	0,49	Cu 60%; Ni 40%
Чугун	0,4—0,5	
Нихром	1,0—1,11	Cr 15%; Ni 62%; Fe 23%; Fe 65%; Cr 30%; Al 5%
Меганир	1,4	Fe 82%; Cr 13,5%; Al 4,5%
Фехраль	1,2	Fe 65,8%; Cr 30%; Al 4,2%
Хромаль	1,35	

Таблица 18

Удельные сопротивления электролитов при 10° Ц в ом·см

Наименование электролита	Удельное сопротивление при 10° Ц, ом·см					
	при концентрации водного раствора					
	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Раствор нашатыря NH ₄ Cl	10,9	5,6	3,9	3,0	2,5	—
Раствор хлористого натрия NaCl	14,9	8,3	6,1	5,1	4,7	—
Раствор цинкового купороса ZnSO ₄	52,4	31,2	24,1	21,3	20,8	22,7
Раствор медного купороса CuSO ₄	52,9	31,3	23,8	—	—	—
Раствор едкого кали КОН	5,8	3,2	2,4	2,0	1,9	1,8
Раствор едкого натра NaOH	5,1	3,2	2,9	3,0	3,7	4,8
Раствор серной кислоты H ₂ SO ₄	4,8	2,6	1,8	1,5	1,4	1,35

Решение. По формуле (48) находим

$$R = \frac{\rho l}{S} = 0,0175 \cdot \frac{300}{6} = 0,875 \text{ ом.}$$

Пользуясь формулой (48), можно найти любую из величин, входящих в нее, если известны остальные три величины. Длина провода определится формулой

$$l = \frac{RS}{\rho}. \quad (50)$$

Пример 32. Сколько метров проволоки диаметром $d = 0,5 \text{ мм}$ необходимо взять для изготовления катушки сопротивлением $R = 6 \text{ ом}$, если проволока изготовлена из нейзильбера с удельным сопротивлением $\rho = 0,3 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Решение. Вначале определим площадь поперечного сечения проволоки

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \approx 0,196 \text{ мм}^2.$$

По формуле (50) находим

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{6 \cdot 0,196}{0,3} = 3,92 \text{ м.}$$

Из формулы (48) можно определить площадь поперечного сечения S проводника:

$$S = \frac{\rho l}{R}. \quad (51)$$

Пример 33. В электролит с удельным сопротивлением $\rho = 2,6 \text{ ом} \cdot \text{см}$ погружены два электрода одинакового размера, расположенных параллельно друг другу на расстоянии $l = 12 \text{ см}$. Определить площади этих электродов, если сопротивление столба электролита между электродами равно $R = 1,3 \text{ ом}$.

Решение. По формуле (51) находим

$$S = \frac{\rho l}{R} = \frac{2,6 \cdot 12}{1,3} = 24 \text{ см}^2.$$

Пример 34. Определить удельное сопротивление проволоки, имеющей длину $l = 12,56 \text{ м}$, диаметр $d = 0,2 \text{ мм}$ и сопротивление $R = 193 \text{ ом}$.

Решение. Определим площадь поперечного сечения провода

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,2^2}{4} = 0,0314 \text{ мм}^2.$$

По формуле (49) найдем удельное сопротивление проволоки

$$\rho = \frac{RS}{l} = \frac{193 \cdot 0,0314}{12,56} = 0,48 \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$$

§ 41. ПРОВОДИМОСТЬ ПРОВОДНИКОВ

Иногда для удобства расчета электрических цепей вместо сопротивления проводника вводят величину, обратную сопротивлению, называемую проводимостью проводника ($G, \text{г}$).

В противоположность сопротивлению проводимость проводника характеризует его способность проводить через себя электрический ток. Чем больше проводимость проводника, тем меньше его сопротивление и тем лучше он проводит электрический ток.

Проводимость G есть величина, обратная сопротивлению R , т. е.

$$G = \frac{1}{R}. \quad (52)$$

Единица измерения проводимости в системе единиц МКСА специального названия не имеет. Из формулы (52) следует, что проводимость имеет размерность $\frac{1}{\text{ом}}$.

Проводник обладает проводимостью, равной единице, если его сопротивление равно одному ому.

Единица проводимости в системе единиц МКСА = $1 \frac{1}{\text{ом}}$.

Пример 35. Определить проводимость проводника, если его сопротивление $R = 0,25 \text{ ом}$.

Решение. По формуле (52) находим

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,25} = 4 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Удельной проводимостью называется величина, обратная удельному сопротивлению:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}, \quad (53)$$

где γ — удельная проводимость в $\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}}$;

ρ — удельное сопротивление в $\text{ом} \cdot \text{м}$.

Если же удельное сопротивление выражено в $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, то соответственно этому удельная проводимость будет выражена в $\frac{\text{м}}{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}$.

В табл. 19 приведены удельные проводимости наиболее употребительных материалов.

Таблица 19

Удельные проводимости важнейших материалов

Материал	Удельная проводимость $\frac{\text{м}}{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}$	Материал	Удельная проводимость $\frac{\text{м}}{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}$
Серебро	61,0	Латунь	15,0—50,0
Медь	57,0	Никелин	3,0
Алюминий	34,0	Константан	2,04
Сталь	10,0	Нейзильбер	2—2,2
Свинец	5,0	Нихром	0,9—1,06

§ 42. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

С изменением температуры сопротивление проводников изменяется. Металлические проводники, за очень небольшим исключением, с ростом температуры увеличивают свое сопротивление. Между приростом сопротивления проводника и температурой его в пределах до 100° Ц существует прямая пропорциональная зависимость. Для определения сопротивления проводника в зависимости от температуры пользуются следующей формулой:

$$R_2 = R_1 + \alpha R_1 (t_2^\circ - t_1^\circ), \quad (54)$$

где R_1 — сопротивление проводника при температуре t_1° Ц;
 R_2 — сопротивление проводника при температуре t_2° Ц;
 α — коэффициент пропорциональности, называемый температурным коэффициентом.

Температурным коэффициентом называется прирост сопротивления проводника, приходящийся на каждый ом его сопротивления при изменении температуры на 1° Ц.

В табл. 20 приведены средние значения температурных коэффициентов наиболее употребительных проводников.

Таблица 20

Температурные коэффициенты проводников

Наименование материала	Температурный коэффициент	Наименование материала	Температурный коэффициент
Серебро	0,004	Нихром	0,00011
Медь	0,00445	Латунь	0,002
Алюминий	0,00423	Нейзильбер	0,00036
Вольфрам	0,00464	Никелин	0,0003
Сталь	0,00625	Манганин	0,000015
Свинец	0,00411	Константан	—0,00003
Ртуть	0,00027	Уголь	—0,0005

Существуют и такие проводники, сопротивление которых с ростом температуры уменьшается, например уголь, сплавы некоторых металлов и электролиты.

Для константана температурный коэффициент $\alpha = -0,00003$, т. е. сопротивление его очень мало уменьшается с повышением температуры. Для растворов солей и кислот температурный коэффициент в среднем равен $\alpha = -0,025$.

Пример 36. Телеграфная линия при температуре $t_1^\circ = -20^\circ$ Ц обладает сопротивлением $R_1 = 800$ ом. Определить сопротивление линии при температуре $t_2^\circ = +30^\circ$ Ц, если температурный коэффициент проволоки равен $\alpha = 0,005$.

Решение. По формуле (54) находим
 $R_2 = R_1 + \alpha R_1 (t_2^\circ - t_1^\circ) = 800 + 0,005 \cdot 800 [30 - (-20)] = 800 + 200 = 1000$ ом,
 т. е. сопротивление линии изменилось на 25%.

§ 43. РЕОСТАТЫ И МАГАЗИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Реостатом называется устройство, дающее возможность изменять сопротивление электрической цепи и тем самым регулировать в ней величину тока.

Реостаты по своей конструкции подразделяются на проволочные и непроволочные. В проволочном реостате токоведущей частью является проволока, а в непроволочном — токопроводящий слой металла, нанесенный на основание из изоляционного материала.

Проволочные реостаты в свою очередь подразделяются на два основных типа: реостаты со скользящим контактом и ступенчатые реостаты.

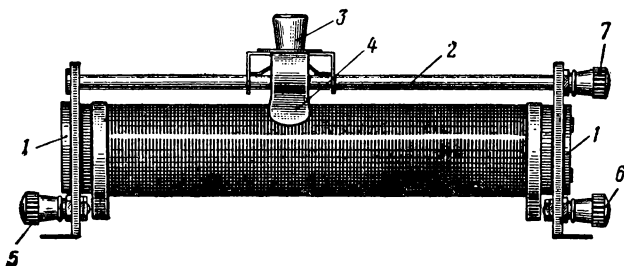


Рис. 59. Реостат со скользящим контактом:

1 — стойки; 2 — направляющий металлический стержень; 3 — ползун;
4 — прижимные контакты; 5, 6 и 7 — зажимы

Реостаты со скользящим контактом. Реостаты со скользящим контактом дают возможность плавно изменять сопротивление электрической цепи.

На рис. 59 показан один из существующих на практике типов реостата со скользящим контактом. На керамиковую трубу его намота проволока из константана или какого-либо иного сплава, применяемого для изготовления реостатной проволоки. Витки этой проволоки уложены на керамиковой трубе плотно друг к другу, так что при скольжении по ним ползуна они не могут быть сдвинуты с места. К стойкам 1 реостата прикреплен направляющий металлический стержень 2, по которому перемещают ползун 3. Последний с помощью своих прижимных контактов 4 плотно прижимается к виткам реостатной проволоки и этим обеспечивает надежный контакт проволоки с ползуном. Реостат имеет три зажима, из которых два (5 и 6) смонтированы на стойках 1, по одному на каждой. К этим зажимам присоединены концы проволоки реостата. Третий зажим (7) присоединен к направляющему стержню 2 реостата.

На рис. 60 приведена схема включения в цепь реостата со скользящим контактом для регулирования величины тока в цепи.

Реостат подключен к цепи зажимами *H* и *П*, из которых первый соединен с началом реостатной обмотки, а второй — с ползуном. Зажим *K*, соединенный с концом реостатной обмотки, оставлен свободным — не присоединенным к цепи. Перемещая скользящий контакт ползуна вдоль витков реостатной проволоки, можно плавно изменять величину вводимого в цепь сопротивления реостата. При крайнем левом положении скользящего контакта ползуна, т. е. когда он установлен непосредственно у зажима *H*, введенное в цепь сопротивление реостата становится минимальным — практически равным нулю. Когда же скользящий контакт ползуна установлен у зажима *K*, то введенное в цепь сопротивление реостата становится максимальным.

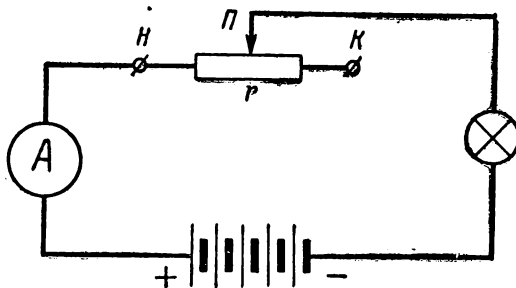


Рис. 60. Включение реостата со скользящим контактом для регулирования тока в цепи

Для устройства реостатов применяют реостатную проволоку, изготовленную из различных сплавов металлов, например никелиновую, константановую, нейзильберовую и т. п., или же из чистых металлов, например из железа или никеля.

Реостатная проволока должна иметь высокое удельное сопротивление, малый температурный коэффициент и устойчиво выдерживать продолжительный нагрев током до нескольких сот градусов Цельсия.

Такие материалы, как нейзильбер, никелин и реотан, дешевы, легко обрабатываются, но не допускают нагревания больше чем до 200° Ц. Что же касается константана и других медноникелевых сплавов, то они выдерживают продолжительный нагрев до температуры 500° Ц.

В табл. 21 приведены данные некоторых сортов реостатной проволоки.

Реостаты со скользящим контактом весьма разнообразны как по конструктивному выполнению, так и по электрическим данным. В качестве примера можно привести реостаты типа РП (реостат ползунковый), изготавливаемые нашей электропромышленностью: реостат типа РП-3, рассчитанный на сопротивления 500 ÷ 1000 ом и соответственно на предельные токи 0,6 ÷ 0,4 а;

Реостатная проволока и ее данные

Наименование материала	Состав сплава	Удельное сопротивление $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Температура плавления, °C	Максимальная рабочая температура, °C
Константан	60% меди, 40% никеля	0,50	1206	500
Манганин	84% меди, 12% никеля, 4% марганца	0,43	910	100
Нейзильбер	60,6% меди, 25,4% цинка, 14% никеля	0,30	1100	200
Никелин	62% меди, 18% никеля, 20% цинка	0,42	1100	200
Нихром	62% никеля, 12% хрома, 26% железа	1,1	1550	1000
Реотан	53,4% меди, 25,3% ни- келя, 16,9% цинка, 4,4% железа	0,47	1100	200

реостат типа РП-4 — на сопротивления $1000 \div 2000 \text{ ом}$ и соответственно на токи $0,4 \div 0,2 \text{ а}$ и реостат типа РП-5 (в защитном металлическом кожухе) — на сопротивления $18 \div 200 \text{ ом}$ и соответственно на токи $4 \div 1 \text{ а}$.

На рис. 61 показан внешний вид одного из типов проволочных реостатов со скользящим контактом, получивших широкое применение в радиотехнике.

Ступенчатые реостаты. Наряду с реостатами, имеющими скользящие контакты, широкое применение нашли ступенчатые реостаты.

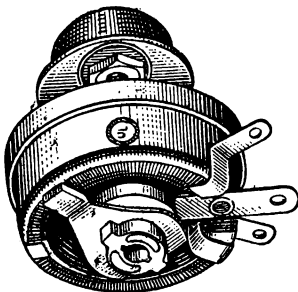


Рис. 61. Реостат со скользящим контактом, применяемый в радиотехнике

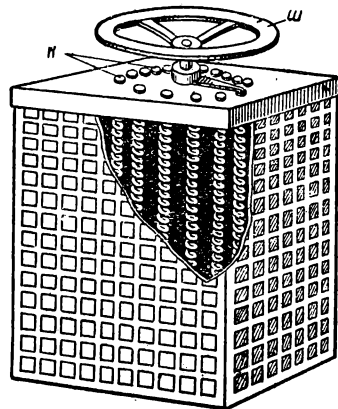


Рис. 62. Ступенчатый реостат:
К — контакты, Ш — штурвал

На рис. 62 показан один из широко применяемых в электротехнике типов ступенчатых реостатов. Он состоит из ряда секций реостатной проволоки, присоединенных к соответствующим контактам *К* на крышке реостата. Изменение сопротивления реостата, введенного в электрическую цепь, достигается путем поворота штурвала *Ш*. При этом ползун, жестко связанный с ним, скользит по

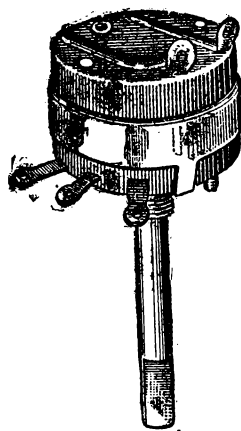
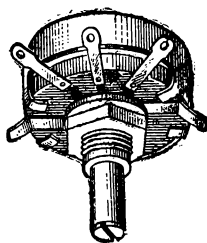


Рис. 63. Непроволочные реостаты

контактам *К*. При переходе ползуна с одного контакта на другой, соседний с ним контакт введенное в цепь сопротивление реостата изменяется скачком на величину сопротивления введенной и выведенной секции реостатной проволоки.

Ступенчатые реостаты применяются главным образом в цепях электрических машин, например, в качестве пусковых реостатов для электродвигателей и т. д.

Непроволочные реостаты: Весьма широкое применение в радиотехнике нашли так называемые непроволочные реостаты. В отличие от проволочных реостатов сопротивление их выполнено в виде пластинки кольцевой формы с нанесенным на нее тончайшим слоем токопроводящего материала. Изменение сопротивления реостата, введенного в электрическую цепь, осуществляется путем поворота ручки реостата. При этом ползун, жестко связанный с ручкой реостата, скользит по токопроводящему слою пластинки реостата и тем самым выводит или вводит часть его сопротивления.

Непроволочные реостаты изготавливаются на различные сопротивления, от килоомов до нескольких мегомов.

На рис. 63 показан внешний вид непроволочных реостатов, применяемых в радиотехнике.

Магазин сопротивлений. Магазином сопротивлений называется прибор, дающий возможность установить с достаточно высокой степенью точности необходимое сопротивление.

На рис. 64 показан штепсельный магазин сопротивлений, состоящий из набора катушек с проволокой различных сопротивлений. Концы проволок катушек присоединены к соответствующим колодочкам, смонтированным на крышке прибора.

Если в гнездо между двумя соседними колодочками вставить

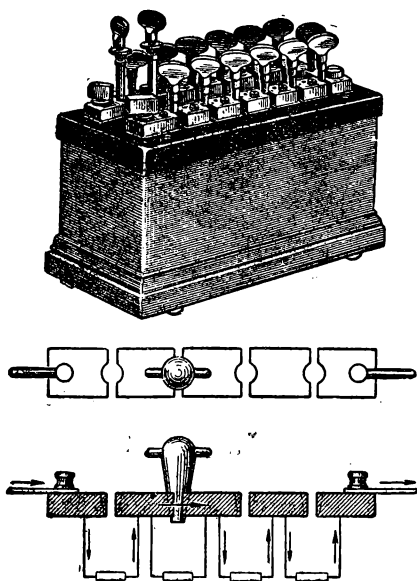


Рис. 64. Внешний вид и схема магазина сопротивлений

штепсель, то сопротивление между колодочками будет близко к нулю; если же штепсель изъять из гнезда, то между колодочками будет введено сопротивление той катушки, концы которой присоединены к этим колодочкам. У каждого гнезда на крышке магазина помечено число, показывающее, какое сопротивление дает магазин, если из данного гнезда вынуть штепсель.

Проволока для магазинов сопротивлений применяется обычно манганиновая или константановая, как обладающая очень малым температурным коэффициентом. Следует помнить, что перегружать магазины сопротивлений током опасно из-за возможности их порчи от перегрева.

§ 44. СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Сопротивления постоянной величины, применяемые в радиотехнике, подразделяются на проволочные и непроволочные.

Сопротивления постоянной величины изготавливаются на различных номинальные сопротивления, от нескольких ом до нескольких мегомов.

Номинальная мощность сопротивлений постоянной величины, т. е. мощность, развиваемая в них током (мощность рассеяния), не должна превышать 3—5 ватт, иначе сопротивление может быть повреждено из-за перегрева его током. Обычно номинальная мощность устанавливается такой, чтобы температура сопротивления при продолжительном нахождении его под нормальным током превышала температуру окружающей среды не больше чем на 50° Ц.

Отклонения истинных величин сопротивления сопротивлений постоянной величины колеблются в пределах ± 5 — ± 20 %.

Электрической прочностью сопротивления постоянной величины называется предельное рабочее напряжение на нем, при котором мощность, развиваемая током в этом сопротивлении, не превышает номинальной и сопротивление может работать под током продолжительное время — несколько тысяч часов.

Электрическая прочность высокоомных сопротивлений постоянной величины достигает обычно нескольких сотен вольт.

Проволочные сопротивления постоянной величины. В технике связи нашли широкое применение постоянные проволочные сопротивления. На рис. 65 приведены типы постоянных проволочных сопротивлений. Они состоят из керамической трубки, на которую намотана проволока из сплава металлов высокого удельного сопротивления (нихром, константан и др.). На концах трубки закреплены колпачки или хомутики, к которым припаяны концы проволоки. При помощи колпачков проволочное сопротивление подключается к схеме. В некоторых постоянных проволочных сопротивлениях концы проволочной катушки припаиваются к гибким жгутам из красной меди. Проволочная обмотка сверху покрыта стекловидной эмалью, предохраняющей проволоку от окисления, механических повреждений и загрязнения и служащей электроизолирующим слоем. Постоянные проволочные сопротивления изготавливаются в пределах от единиц омов до нескольких десятков тысяч омов.

Основное достоинство проволочных сопротивлений постоянной величины — их способность выдерживать относительно большую перегрузку током и стабильность величины их сопротивлений. Недостаток их — относительно большая величина собственных индуктивности и емкости, что приводит к сильной зависимости величины их сопротивления от частоты тока. Чтобы снизить собственные индуктивность и емкость сопротивления, применяют специальные способы намотки проволоки.

Непроволочные сопротивления постоянной величины. В непроволочных сопротивлениях токопроводящей деталью является полупроводник, например, из углерода или тонкого слоя металлизации.

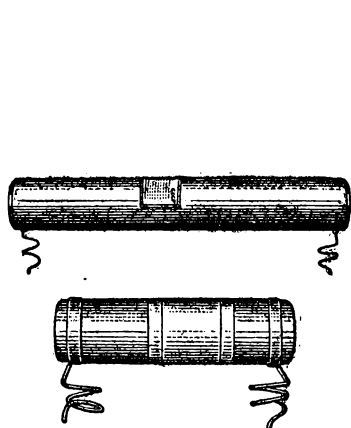


Рис. 65. Постоянные проволочные сопротивления

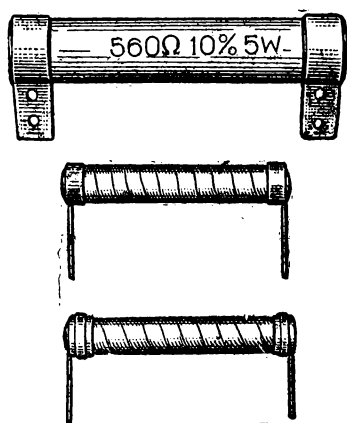


Рис. 66. Постоянные непроволочные сопротивления

Наибольшее применение в радиотехнике получили непроволочные сопротивления типов ВС и МЛТ. Устройство их несложно. На фарфоровый стержень нанесен слой углерода или тончайший (молекулярный) слой металлизации. Эти полупроводящие слои покрыты сверху специальным лаком, что предохраняет их от влияния внешней среды и механического повреждения. На концах этих сопротивлений установлены металлические контакты, к которым припаиваются проводники радиотехнической схемы.

На рис. 66 приведены некоторые основные типы постоянных непроволочных сопротивлений.

§ 45. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

Идеальных диэлектриков в природе нет, а поэтому нельзя проводить резкую грань между диэлектриками и полупроводниками. Всякий диэлектрик в той или иной степени обладает проводимостью, величина которой зависит от состояния диэлектрика и внешних физических условий.

В табл. 22 приведены средние значения удельных сопротивлений различных диэлектриков и полупроводников.

Таблица 22

Удельные сопротивления диэлектриков и полупроводников

Материал	Удельное сопротивление, ом·см	Материал	Удельное сопротивление, ом·см
Бакелит	10^{11} — 10^{14}	Пахотная земля	$3,5 \cdot 10^3$ — $10 \cdot 10^3$
Бумага кабельная	10^{12} — 10^{13}	Песок	$10 \cdot 10^3$ — $100 \cdot 10^3$
Глинистые породы	$1,5 \cdot 10^3$ — $10 \cdot 10^3$	Электрокартон	10^{11} — 10^{12}
Дерево парафинированное	10^{12}	Слюда	10^{12} — 10^{17}
Каучук	10^{14} — 10^{16}	Стекло	10^{11} — 10^{15}
Камень песчаный	10^{11}	Растительный перегной	10^3 — $10 \cdot 10^3$
Кварц плавленый	10^{16}	Фибра	10^9 — 10^{10}
Масло трансформаторное	10^{12} — 10^{13}	Фарфор	10^{14} — 10^{15}
Миканит	10^{15}	Чернозем	$8 \cdot 10^3$ — $20 \cdot 10^3$
Мрамор	10^9 — 10^{11}	Шеллак	10^{15} — 10^{16}
Парафин	10^{15} — 10^{16}	Шифер	10^7 — 10^{10}
		Целлулоид	$2 \cdot 10^{10}$
		Эбонит	10^{17}
		Экссельсиор	10^{12} — 10^{13}

Пример 37. Требуется определить сопротивление эбонитовой пластинки, имеющей площадь поперечного сечения $S = 10$ кв. см и толщину $l = 0,5$ см. Удельное сопротивление эбонита $\rho = 10^{17}$ ом·см.

Решение. Применяя формулу (48), находим

$$R = \rho \frac{l}{S} = 10^{17} \frac{0,5}{10} = 5 \cdot 10^{15} \text{ ом,}$$

т. е. данная эбонитовая пластинка обладает сопротивлением в пять миллионов миллиардов ом.

ГЛАВА IX

ПРОСТАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 46. ЗАКОН ОМА ДЛЯ УЧАСТКА ЦЕПИ

Опытом установлено, что между током I , протекающим по участку цепи, напряжением U , приложенным к этому участку цепи, и сопротивлением R последнего существует строго определенная зависимость (рис. 67).

Чем больше напряжение U , приложенное к участку цепи, обладающему неизменным сопротивлением R , тем больше ток I в этом участке, и, наоборот, чем меньше это напряжение, тем меньше ток. Это понятно, так как чем больше напряжение на участке цепи, тем сильнее электрическое поле внутри проводника этого участка, тем с большей силой действуют электрические силы этого поля на электрические заряды проводника и тем, следовательно, больше ток в нем. Наоборот, чем меньше напряжение, тем слабее электрическое поле в проводнике, тем, следовательно, меньше ток в нем.

Если величину напряжения U на данном участке цепи поддерживать постоянной и в то же время изменять сопротивление R , то и в этом случае ток на участке цепи будет изменяться. В частности, если сопротивление R будет возрастать, то ток, протекающий по участку, будет уменьшаться. Это объясняется тем, что с ростом сопротивления участка цепи увеличивается противодействие вещества проводника этого участка электрическим зарядам. А так как сила поля в проводниках участка цепи сохраняется неизменной из-за постоянства приложенного к нему напряжения U , то, естественно, скорость направленного движения зарядов в проводнике изменится и, следовательно, уменьшится

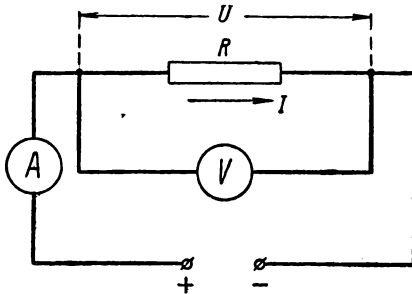


Рис. 67. К участку цепи с сопротивлением R приложено напряжение U , по цепи проходит ток I

ток в нем. Наоборот, если сопротивление проводника участка цепи уменьшится, то скорость направленного движения электрических зарядов в проводнике при заданном неизменном напряжении U увеличится, т. е. ток в проводнике возрастет.

Зависимость между током I , напряжением U и сопротивлением R на участке цепи была впервые установлена в 1827 г. немецким физиком Г. С. Омом и вошла в электротехнику под названием закона Ома.

Для участка цепи закон Ома формулируется следующим образом: величина тока I на участке цепи прямо пропорциональна напряжению U , приложенному к этому участку, и обратно пропорциональна его сопротивлению R .

Математически закон Ома для участка цепи выражается формулой

$$I = \frac{U}{R}, \quad (55)$$

где I — ток в амперах;

R — сопротивление в омах;

U — напряжение в вольтах.

Пример 38. Определить ток I в потребителе, обладающем сопротивлением $R = 250$ ом, если напряжение, приложенное к нему, $U = 125$ в.

Решение. По формуле (55) находим

$$I = \frac{U}{R} = \frac{125}{250} = 0,5 \text{ а.}$$

Из формулы (55) следует, что

$$U = IR, \quad (56)$$

т. е. напряжение, приложенное к участку цепи, равно произведению величины тока I на величину сопротивления R .

Пример 39. Определить, какое напряжение надо подать на зажимы электронной лампы для питания нити накала ее, если известно, что при сопротивлении лампы $R = 24$ ом через ее нить должен протекать ток $I = 150$ ма.

Решение. По формуле (56) находим

$$U = IR = 0,15 \cdot 24 = 3,6 \text{ в.}$$

Из формулы (55) также следует, что

$$R = \frac{U}{I}, \quad (57)$$

т. е. сопротивление участка цепи численно равно отношению напряжения U к величине тока I на данном участке цепи.

Пример 40. Определить сопротивление R проволоки катушки, если известно, что при напряжении $U = 125$ в ток в ней равен $I = 0,4$ а.

Решение. По формуле (57) находим

$$R = \frac{U}{I} = \frac{125}{0,4} = 312,5 \text{ ом.}$$

§ 47. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ВСЕЙ ЦЕПИ

Закон Ома для всей цепи устанавливает зависимость между электродвижущей силой E источника электрической энергии, величиной тока I в цепи и полным сопротивлением R последней.

Пусть задана простая электрическая цепь (рис. 68), состоящая из источника электрической энергии, обладающего электродвижущей силой E и внутренним сопротивлением R_0 , и внешнего сопротивления R_1 . Если эту цепь замкнуть, то в ней установится некоторый ток I .

Напряжение U_1 , приложенное к внешнему сопротивлению R_1 , согласно формуле (56) равно

$$U_1 = IR_1.$$

Аналогично этому во внутреннем участке цепи напряжение

$$U_0 = IR_0.$$

Электродвижущая сила E источника электрической энергии, как известно, равна сумме напряжений на внутреннем и внешнем участках цепи, т. е.

$$E = U_0 + U_1,$$

или, иначе,

$$E = IR_0 + IR_1 = I(R_0 + R_1).$$

Отсюда находим, что

$$I = \frac{E}{R_0 + R_1} = \frac{E}{R}, \quad (58)$$

где $R = R_0 + R_1$ — полное сопротивление (эквивалентное сопротивление) всей цепи в омах;

R_0 — внутреннее сопротивление источника электрической энергии в омах;

R_1 — внешнее сопротивление цепи в омах;

E — электродвижущая сила источника электрической энергии в вольтах;

I — ток в цепи в амперах.

Формула (58) является математическим выражением закона Ома для всей простой цепи.

Закон Ома для всей цепи формулируется следующим образом: величина тока I в цепи прямо пропорциональна электро-

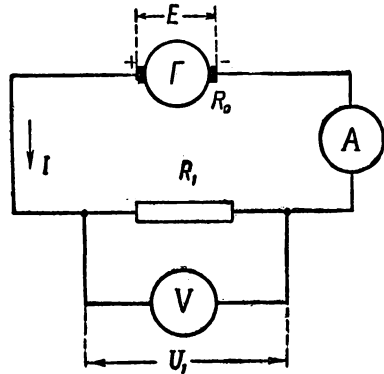


Рис. 68. Схема простой цепи постоянного тока

движущей силе E источника электрической энергии и обратно пропорциональна полному сопротивлению R всей цепи.

Под полным сопротивлением цепи надо понимать сумму сопротивлений внутреннего (R_0) и внешнего (R_1) участков цепи.

Пример 41. К источнику электрической энергии с электродвижущей силой $E = 3$ в и внутренним сопротивлением $R_0 = 1$ ом подключен микрофон телефонного аппарата, имеющий в спокойном состоянии сопротивление, равное $R_1 = 47$ ом. Определить ток I в цепи микрофона, напряжение U_1 , приложенное к микрофону, напряжение U_0 на внутреннем участке цепи.

Решение. Полное сопротивление R всей цепи

$$R = R_0 + R_1 = 1 + 47 = 48 \text{ ом.}$$

Ток в цепи

$$I = \frac{E}{R} = \frac{3}{48} = 0,0625 \text{ а.}$$

Напряжение U_1 на микрофоне

$$U_1 = IR_1 = 0,0625 \cdot 47 = 2,9375 \text{ в.}$$

Напряжение U_0 на внутреннем участке цепи

$$U_0 = IR_0 = 0,0625 \cdot 1 = 0,0625 \text{ в.}$$

§ 48. ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ ПОТРЕБИТЕЛЯМИ

Если потребители включены в электрическую цепь один за другим в ряд, т. е. последовательно, так что электрический ток нигде не ответвляется, то такая цепь называется *последовательной*.

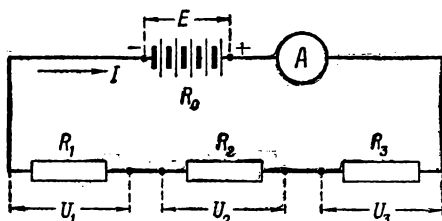


Рис. 69. Схема последовательной цепи

На рис. 69 изображена схема последовательной цепи, состоящей из источника электрической энергии с электродвижущей силой E и внутренним сопротивлением R_0 и трех последовательно соединенных потребителей, обладающих сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 .

Так как в последовательной цепи электрический ток нигде не ответвляется и электрические заряды на пути своего движения нигде не накапливаются, то количество электрических зарядов, проходящих через любое поперечное сечение проводников цепи в единицу времени, всюду одинаково.

Отсюда следует, что *величина тока во всех участках последовательной цепи независимо от величин их сопротивлений устанавливается одинаковой:*

$$I_1 = I_2 = I_3 = I, \quad (59)$$

где I_1 , I_2 и I_3 — токи в отдельных участках цепи.

Справедливость этого положения легко проверить, включая амперметр в различные участки последовательной цепи.

Напряжения на отдельных участках цепи равны

$$U_1 = IR_1; U_2 = IR_2; U_3 = IR_3. \quad (60)$$

Так как ток во всех участках цепи одинаков, а сопротивления их в общем случае различны, то и напряжения на отдельных участках последовательной цепи должны быть в общем случае различными.

Разделив поочередно равенства (60) друг на друга, найдем соотношение напряжений на участках последовательной цепи:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}; \frac{U_2}{U_3} = \frac{R_2}{R_3}; \frac{U_3}{U_1} = \frac{R_3}{R_1}, \quad (61)$$

т. е. напряжение в последовательной цепи распределяется по отдельным участкам ее прямо пропорционально их сопротивлениям.

Следовательно, чем больше сопротивление одного участка цепи по сравнению с сопротивлением другого, тем больше напряжение на зажимах первого из них по сравнению с напряжением на зажимах второго.

Общее напряжение U , приложенное ко всей внешней последовательной цепи, равно сумме напряжений, приложенных к отдельным участкам цепи, т. е.

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (62)$$

В справедливости формул (61) и (62) легко убедиться, измеряя вольтметром напряжения на зажимах всей цепи и на отдельных ее участках.

Если все члены формулы (62) разделить на величину тока I , которая по условию постоянна, то получим

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I}:$$

Исходя из формулы закона Ома для участка цепи, вместо последнего равенства можно написать

$$R = R_1 + R_2 + R_3, \quad (63)$$

где R — полное (эквивалентное) сопротивление всей цепи; R_1 , R_2 и R_3 — сопротивления отдельных участков цепи (потребителей).

Из формулы (63) следует, что полное (эквивалентное) сопротивление последовательной цепи равно сумме сопротивлений отдельных ее участков.

Закон Ома для внешнего участка последовательной цепи выразится формулой

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad (64)$$

т. е. величина тока I на внешнем участке последовательной цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению U и обратно пропорциональна его полному сопротивлению R .

Внутренний и внешний участки всей цепи соединены между собой последовательно, а поэтому формула закона Ома для всей последовательной цепи принимает вид

$$I = \frac{E}{R_0 + R_1 + R_2 + R_3} = \frac{E}{R},$$

т. е. величина тока I во всей последовательной цепи прямо пропорциональна электродвижущей силе E источника электрической энергии, действующего в цепи, и обратно пропорциональна полному сопротивлению R всей цепи.

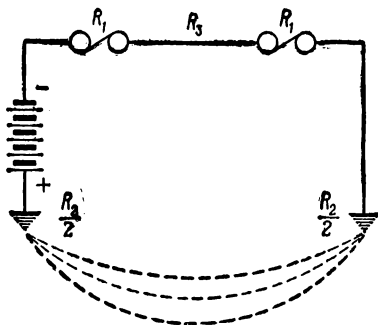


Рис. 70. Схема простейшей телеграфной цепи

Пример 42. Два телеграфных аппарата М-44, имеющие сопротивление $R_1 = 340$ ом каждый, соединены последовательно медным проводом телеграфной линии протяженностью 35 км (рис. 70). Определить ток I в цепи и распределение напряжения по отдельным ее участкам, если сопротивление линии составляет 6 ом на километр, сопротивление заземлений (земля является «обратным проводом») $R_2 = 108$ ом, электродвижущая сила источника электрической энергии, питающего аппараты М-44, $E = 20$ в и его внутреннее сопротивление $R_0 = 2$ ом.

Решение. Сопротивление R_3 всего медного провода

$$R_3 = 35 \cdot 6 = 210 \text{ ом.}$$

Полное сопротивление всей цепи

$$R = 2R_1 + R_2 + R_3 + R_0 = 2 \cdot 340 + 108 + 210 + 2 = 1000 \text{ ом.}$$

Ток в цепи

$$I = \frac{E}{R} = \frac{20}{1000} = 0,02 \text{ а.}$$

Напряжение на каждом из аппаратов М-44

$$U_1 = IR_1 = 0,02 \cdot 340 = 6,8 \text{ в.}$$

Напряжение, теряемое в заземлениях,

$$U_2 = IR_2 = 0,02 \cdot 108 = 2,16 \text{ в.}$$

Напряжение, теряемое в медном проводе,

$$U_3 = IR_3 = 0,02 \cdot 210 = 4,2 \text{ в.}$$

Напряжение, теряемое внутри источника электрической энергии,

$$U_0 = IR_0 = 0,02 \cdot 2 = 0,04 \text{ в.}$$

Проверка правильности решения задачи:

$$E = U_1 + U_2 + U_3 + U_0 = 2 \cdot 6,8 + 2,16 + 4,2 + 0,04 = 20 \text{ в.}$$

§ 49. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Если в электрической цепи течет постоянный ток, значит внутри проводников этой цепи имеется стационарное электрическое поле. Потенциал его изменяется по величине при переходе от одной точки поля в другую в направлении тока.

Наибольшим потенциалом во внешнем участке цепи обладает положительный зажим источника электрической энергии, к которому подключен данный внешний участок цепи, а наименьшим потенциалом — отрицательный зажим.

Падение потенциала происходит в проводниках цепи в направлении течения постоянного тока. Наоборот, прирост потенциала можно наблюдать в противоположном направлении.

Если известен потенциал какой-либо точки цепи, то, зная направление и величину тока, а также сопротивления отдельных участков цепи, можно определить потенциалы любых точек этой цепи.

Допустим, что на некотором участке цепи ab (рис. 71) течет постоянный ток I , а сопротивление этого участка равно r_{ab} . Если известен потенциал точки a , то можно определить потенциал точки b .

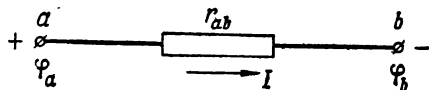


Рис. 71. На участке цепи ab падение потенциала происходит в направлении от точки a к точке b

Так как ток I в участке цепи течет от точки a к точке b , то потенциал φ_a первой из них больше, чем потенциал φ_b второй, т. е.

$$\varphi_a > \varphi_b.$$

Падение напряжения на участке ab цепи равно произведению тока I на сопротивление r_{ab} этого участка, т. е.

$$U_{ab} = Ir_{ab}.$$

Но напряжение U_{ab} равно разности потенциалов точек a и b , т. е.

$$\varphi_a - \varphi_b = Ir_{ab}.$$

Из последнего равенства получаем

$$\varphi_b = \varphi_a - I r_{ab},$$

т. е. потенциал φ_b конечной точки b участка цепи ab равняется потенциалу φ_a начальной точки a этого участка минус падение напряжения в сопротивлении r_{ab} .

Наоборот, если бы необходимо было по заданному потенциалу φ_b точки b определить потенциал φ_a точки a , то мы применили бы формулу

$$\varphi_a = \varphi_b + I r_{ab},$$

т. е. потенциал φ_a начальной точки a участка цепи ab равен потенциалу φ_b конечной точки b этого участка плюс падение потенциала на сопротивлении r_{ab} .

На внутреннем участке цепи также происходит падение потенциала в направлении тока, т. е. от минус-зажима источника электрической энергии к плюсу. Однако наряду с этим на внутреннем участке цепи наблюдается скачок потенциала на величину, равную электродвижущей силе E источника электрической энергии. Этот скачок потенциала будет положительным, если перемещаться по источнику электрической энергии в направлении действия электродвижущей силы, и отрицательным, если перемещаться в противоположном направлении.

Потенциал — величина относительная. Численное значение потенциала зависит от величины потенциала некоторой исходной точки цепи. Условно принято считать, что потенциал земли равен нулю и, следовательно, всякая заземленная точка имеет нулевой потенциал. Если перемещаться по электрической цепи от точки с нулевым потенциалом в направлении тока, то будет наблюдаться падение потенциала, т. е. последний будет приобретать отрицательные значения. Наоборот, если перемещаться от точки цепи с нулевым потенциалом навстречу току, то будет наблюдаться прирост потенциала, т. е. последний будет приобретать положительные значения.

Графическое изображение изменения потенциала вдоль всей замкнутой электрической цепи называется потенциалной диаграммой.

В примере 43 показан расчет потенциалов электрической цепи и метод построения потенциалной диаграммы для нее.

Пример 43. Требуется построить потенциалную диаграмму для цепи (рис. 72), если электродвижущие силы источников электрической энергии $E_1 = 16$ в и $E_2 = 4$ в, а их внутренние сопротивления соответственно равны $r_{01} = 1$ ом, $r_{02} = 1$ ом; остальные сопротивления цепи равны: $r_1 = 2$ ом, $r_2 = 1,5$ ом и $r_3 = 0,5$ ом.

Решение. Вначале определим направление и величину тока в цепи. Электродвижущие силы E_1 и E_2 направлены навстречу друг другу. Следовательно, результирующая электродвижущая сила будет равна разности $E_1 - E_2$, а ток будет иметь направление, совпадающее с направлением действия электродвижущей силы E_1 , так как $E_1 > E_2$. Значит, ток I во внешней цепи имеет направление от плюс-зажима источника электрической энергии с электродвижущей силой E_1 к минус-зажиму, как обозначено на рис. 72 стрелкой.

Величину тока I найдем, исходя из формулы закона Ома для последовательной цепи

$$I = \frac{E_1 - E_2}{r_{01} + r_1 + r_{02} + r_2 + r_3} = \frac{16 - 4}{1 + 2 + 1 + 1,5 + 0,5} = 2 \text{ а.}$$

Потенциал точки a равен нулю ($\varphi_a = 0$), так как эта точка заземлена.

Потенциал точки b ниже потенциала точки a на величину падения напряжения в сопротивлении r_{01} :

$$\varphi_b = \varphi_a - I r_{01} = 0 - 2 = -2 \text{ в.}$$

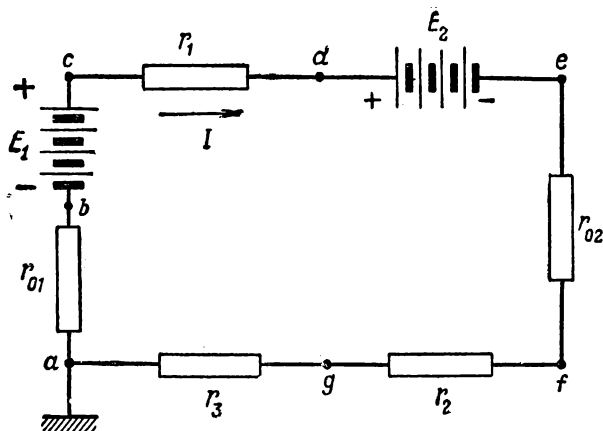


Рис. 72. Схема электрической цепи, заземленной в точке a

Потенциал точки c больше потенциала точки b на величину, равную электродвижущей силе E_1 :

$$\varphi_c = \varphi_b + E_1 = -2 + 16 = 14 \text{ в.}$$

Потенциал точки d меньше потенциала точки c на величину падения напряжения в сопротивлении r_1 :

$$\varphi_d = \varphi_c - I r_1 = 14 - 2 \cdot 2 = 10 \text{ в.}$$

Потенциал точки e меньше потенциала точки d на величину электродвижущей силы E_2 , так как эта электродвижущая сила направлена навстречу току I :

$$\varphi_e = \varphi_d - E_2 = 10 - 4 = 6 \text{ в.}$$

Потенциал точки f меньше потенциала точки e на величину падения напряжения в сопротивлении r_{02} :

$$\varphi_f = \varphi_e - I r_{02} = 6 - 2 \cdot 1 = 4 \text{ в.}$$

Потенциал точки g меньше потенциала точки f на величину падения напряжения в сопротивлении r_2 :

$$\varphi_g = \varphi_f - Ir_2 = 4 - 2 \cdot 1,5 = 1 \text{ в.}$$

Потенциал точки a меньше потенциала точки g на величину падения напряжения в сопротивлении r_3 :

$$\varphi_a = \varphi_g - Ir_3 = 1 - 2 \cdot 0,5 = 0.$$

Для построения потенциальной диаграммы нанесем на плоскость чертежа две взаимно перпендикулярные оси. По горизонтальной оси отложим в некотором масштабе сопротивления, а по вертикальной — потенциалы (рис. 73).

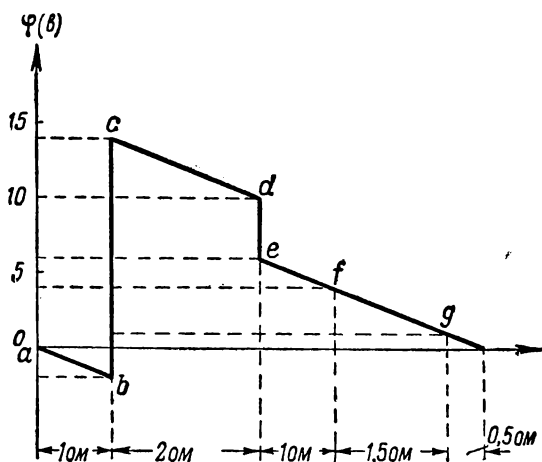


Рис. 73. Потенциальная диаграмма

Изменение потенциала между точками a и b показано в виде наклонной прямой ab , между точками b и c — в виде вертикальной прямой bc , между точками c и d — в виде наклонной прямой cd , между точками d и e — в виде вертикальной прямой de , между точками e и f — в виде наклонной прямой ef , между точками f и g — в виде прямой fg и между точками g и a — в виде наклонной прямой ga .

ГЛАВА X

РАБОТА И МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

§ 50. РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Электрический ток, проходя по проводникам, совершает работу, превращая электрическую энергию в какую-либо иную энергию: тепловую, световую, механическую, химическую и т. д. В дальнейшем мы ознакомимся более подробно с превращением электрической энергии в другие виды энергии, а пока рассмотрим основные формулы, по которым можно подсчитать расход электрической энергии.

Если к потребителю электрической энергии приложено напряжение один вольт, то это значит, что источник электрической энергии, перенося один кулон электричества через потребитель, расходует в нем один джоуль электрической энергии.

Если же к потребителю приложено напряжение U вольт и при этом через него проходит q кулонов электричества, то источник электрической энергии отдает потребителю электрическую энергию, равную

$$W = Uq. \quad (65)$$

Электрический ток превращает эту энергию в какой-либо иной вид энергии, а поэтому принято говорить, что электрический ток, проходя через потребитель, совершает работу. Величина этой работы A равна величине электрической энергии, израсходованной источником, т. е.

$$A = W = Uq. \quad (66)$$

Пример 44. Напряжение, приложенное к электрической лампочке, $U = 127$ в. Определить энергию, израсходованную в лампочке источником электрической энергии, если через лампочку прошло количество электричества, равное $q = 200$ к.

Решение. По формуле (66) находим

$$W = Uq = 127 \cdot 200 = 25\,400 \text{ дж.}$$

Как известно, количество электричества q , прошедшее через потребитель за время t , равно произведению тока I на время t , т. е.

$$q = It.$$

Подставив вместо q это его выражение в формулу (66), получим вторую разновидность формулы по определению величины работы электрического тока:

$$A = UIt, \quad (67)$$

где A — работа в джоулях;
 U — напряжение в вольтах;
 I — ток в амперах;
 t — время в секундах.

Пример 45. Электрический чайник подключен к сети с напряжением $U = 220$ в. Определить энергию, израсходованную в чайнике за $t = 12$ мин., если ток в нагревательном элементе чайника был равен $I = 2,5$ а.

Решение. По формуле (67) находим

$$W = UIt = 220 \cdot 2,5 \cdot 12 \cdot 60 = 396\,000 \text{ дж.}$$

Формулу (67) можно преобразовать, принимая во внимание, что

$$U = IR,$$

тогда

$$A = I^2 Rt. \quad (68)$$

Пример 46. Через нить накала электронной лампы проходил ток $I = 150$ ма в течение времени $t = 2$ часа. Определить энергию, израсходованную источником электрической энергии в нити лампы, если сопротивление ее $R = 24$ ом.

Решение. По формуле (68) находим

$$W = I^2 Rt = 0,15^2 \cdot 24 \cdot 2 \cdot 60 \cdot 60 = 3888 \text{ дж.}$$

Формулу (68) также можно преобразовать, принимая во внимание, что

$$I = \frac{U}{R},$$

тогда

$$A = \frac{U^2}{R^2} Rt = \frac{U^2}{R} t. \quad (69)$$

Пример 47. Напряжение U , приложенное к катушке, равно 12 в. Определить работу электрического тока в катушке за время $t = 10$ минут, если сопротивление катушки $R = 300$ ом.

Решение. По формуле (69) находим

$$A = \frac{U^2}{R} t = \frac{12^2}{300} \cdot 10 \cdot 60 = 288 \text{ Дж.}$$

В электротехнике сильных токов для измерения работы электрического тока принимается единица, называемая киловатт-час (квт-ч, kWh).

$$1 \text{ киловатт-час} = 3\,600\,000 \text{ джоулям.}$$

В табл. 23 приведены единицы измерения работы электрического тока с их условными обозначениями и соотношения с основной единицей.

Таблица 23

Единицы измерения работы электрического тока в системе единиц МКСА

Наименование величины и ее обозначение	Название единицы	Обозначение		Соотношение с основной единицей
		русское	международное	
Работа A	{ джоуль. гектоватт-час киловатт-час	дж	J	—
		гвт-ч	hWh	$3,6 \cdot 10^5 \text{ Дж}$
		квт-ч	kWh	$3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$

Примечание. За единицу измерения работы электрического тока в абсолютной электростатической системе единиц СГСЭ принимается 1 эрг.

$$1 \text{ джоуль} = 10^7 \text{ эргов.}$$

§ 51. МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Мощностью электрического тока называется его работа, отнесенная к единице времени:

$$P = \frac{A}{t}, \quad (70)$$

где P — мощность электрического тока;

A — работа электрического тока, совершенная за время t .

В системе единиц МКСА за единицу измерения мощности принимается один ватт (вт, W). Электрический ток развивает мощность в один ватт, если он каждую секунду совершает работу, равную одному джоулю:

$$1 \text{ ватт} = \frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ секунда}}. \quad (71)$$

В табл. 24 приведены единицы измерения мощности с указанием их условных обозначений и соотношений с основной единицей.

Таблица 24

Единицы измерения мощности в системе единиц МКСА

Наименование величины и ее обозначение	Название единицы	Обозначение		Соотношение с основной единицей
		русское	международное	
Мощность P	ватт	<i>вт</i>	W	—
	киловатт	<i>квт</i>	kW	10^3 <i>вт</i>
	гектоватт	<i>гвт</i>	hW	10^2 <i>вт</i>
	милливатт	<i>мвт</i>	mW	10^{-3} <i>вт</i>
	микроватт	<i>мквт</i>	μ W	10^{-6} <i>вт</i>

Пример 48. Электрический ток в течение $t = 8$ мин. совершил работу $A = 1200$ джоулей. Определить мощность, развиваемую током.

Решение. По формуле (70) находим

$$P = \frac{A}{t} = \frac{1200}{8 \cdot 60} = 2,5 \text{ вт.}$$

Подставив в формулу (70) вместо A выражения из формул (67), (68) и (69), получим еще три разновидности формул для определения мощности электрического тока:

$$P = \frac{UIt}{t} = UI, \quad (72)$$

т. е. мощность электрического тока равна произведению величины тока I на величину напряжения U ;

$$P = \frac{I^2 R t}{t} = I^2 R, \quad (73)$$

т. е. мощность, развиваемая током в неизменном сопротивлении R , прямо пропорциональна квадрату величины тока;

$$P = \frac{U^2 t}{R t} = \frac{U^2}{R}, \quad (74)$$

т. е. мощность электрического тока, развиваемая им в неизменном сопротивлении R , пропорциональна квадрату напряжения, приложенного к этому сопротивлению.

Пример 49. Напряжение, приложенное к реостату, $U = 40$ в. Определить мощность, развиваемую в реостате, если ток в последнем $I = 25$ а.

Решение. По формуле (72) находим

$$P = UI = 40 \cdot 25 = 1000 \text{ вт} = 1 \text{ квт.}$$

Пример 50. Каким сопротивлением обладает электрическая лампа при горении, если при токе $I = 0,5$ а она потребляет мощность $P = 50$ вт.

Решение. Из формулы (73) находим

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{50}{0,5^2} = 200 \text{ ом.}$$

Пример 51. Под каким напряжением находится электрический нагревательный прибор, имеющий сопротивление $R = 24 \text{ ом}$, если он потребляет мощность $P = 600 \text{ вт}$.

Решение. Из формулы (74) находим

$$U = \sqrt{PR} = \sqrt{600 \cdot 24} = 120 \text{ в.}$$

§ 52. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА В ЦЕПИ С ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ИМЕЮЩИМ ПОСТОЯННУЮ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩУЮ СИЛУ И ПОСТОЯННОЕ ВНУТРЕННЕЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Ознакомившись с расчетными формулами и единицами измерения мощности и работы электрического тока, исследуем режим в цепи с источником электрической энергии, обладающим постоянной электродвижущей силой и постоянным внутренним сопротивлением.

Допустим, что задана электрическая цепь постоянного тока (рис. 74), состоящая из источника электрической энергии, обладающего постоянной электродвижущей силой E и постоянным внутренним сопротивлением R_0 , и потребителя, сопротивление которого R_1 можно изменять от нуля до бесконечно большой величины. Исследуем для заданной цепи зависимость напряжения U на зажимах источника

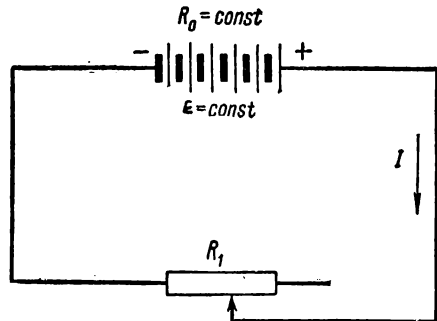


Рис. 74. Схема электрической цепи с $E = \text{const}$, $R_0 = \text{const}$ и переменным сопротивлением R_1

электрической энергии, полной мощности P_0 , полезной мощности P и электрического коэффициента полезного действия η от нагрузки (тока) I в цепи, начиная от режима холостого хода до режима короткого замыкания источника электрической энергии.

При режиме холостого хода источника электрической энергии ток в цепи равен нулю, так как сопротивление внешнего участка цепи бесконечно велико (внешняя цепь отключена от источника электрической энергии), т. е.

$$I_{x.x} = 0, R_{1x.x} = \infty,$$

где $I_{x.x}$ — ток холостого хода;

$R_{1x.x}$ — внешнее сопротивление при холостом ходе.

При режиме короткого замыкания источника электрической энергии ток в цепи достигает максимальной величины, так как сопротивление внешнего участка цепи равно нулю, т. е.

$$I_{к.з} = \frac{E}{R_0} \text{ и } R_{вн.з} = 0,$$

где $I_{к.з}$ — ток короткого замыкания источника электрической энергии;

$R_{вн.з}$ — внешнее сопротивление при коротком замыкании.

1. Напряжение на зажимах источника электрической энергии, как известно, равно разности между электродвижущей силой источника электрической энергии и падением напряжения во внутренней цепи последнего, т. е.

$$U = E - IR_0, \quad (75)$$

где U — напряжение источника электрической энергии в вольтах;

E — электродвижущая сила в вольтах;

R_0 — внутреннее сопротивление в омах;

I — нагрузка источника электрической энергии в амперах.

Так как электродвижущая сила источника электрической энергии по условию постоянна, т. е. $E = \text{const}$, и внутреннее сопротивление его также постоянно, т. е. $R_0 = \text{const}$, то, как это видно из формулы, между напряжением U и током I существует линейная зависимость. Это значит, что график зависимости напряжения U от тока I должен изображаться прямой линией. Для построения этого графика необходимо определить какие-либо две его точки, так как по двум точкам всегда можно построить прямую линию. В данном случае для определения этих двух точек графика мы воспользуемся режимами холостого хода и короткого замыкания.

а) При холостом ходе

$$I_{х.х} = 0.$$

Подставив величину тока холостого хода $I_{х.х}$ в формулу (75), получим

$$U_{х.х} = E - I_{х.х}R_0 = E - 0 \cdot R_0 = E,$$

где $U_{х.х}$ — напряжение на зажимах источника электрической энергии при холостом ходе.

Следовательно, напряжение на зажимах источника электрической энергии при холостом ходе равно электродвижущей силе этого источника.

б) При коротком замыкании

$$I_{к.з} = \frac{E}{R_0}.$$

Подставив величину тока короткого замыкания $I_{к.з}$ в формулу (75), получим

$$U_{к.з} = E - I_{к.з} R_0 = E - \frac{E}{R_0} R_0 = E - E = 0,$$

где $U_{к.з}$ — напряжение на зажимах источника электрической энергии при коротком замыкании.

Следовательно, напряжение на зажимах источника электрической энергии при коротком замыкании его равно нулю.

На рис. 75 показан график зависимости напряжения U источника электрической энергии, обладающего постоянной электродвижущей силой E и постоянным внутренним сопротивлением R_0 , от нагрузки I . Здесь угол β характеризует степень наклона прямой (графика) к горизонтальной оси, т. е. быстроту падения напряжения U с ростом нагрузки I . Величину угла β можно определить из прямоугольного треугольника $OU_{к.з}I_{к.з}$ по его тангенсу

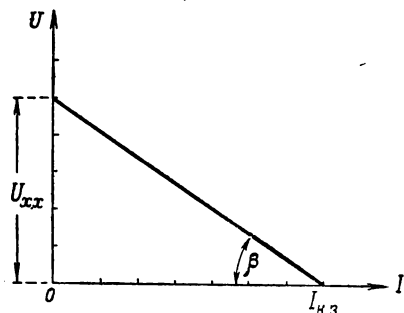


Рис. 75. График зависимости напряжения U от тока I

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{U_{к.з}}{I_{к.з}} = \frac{E}{R_0} = R_0.$$

Следовательно, чем больше внутреннее сопротивление R_0 , тем больше $\operatorname{tg} \beta$ и угол β , т. е. тем быстрее уменьшается напряжение U с ростом нагрузки I . Отсюда можно сделать практический вывод, что чем меньше внутреннее сопротивление R_0 источника электрической энергии, тем меньше зависимость напряжения U на зажимах источника электрической энергии от нагрузки I . При весьма малом внутреннем сопротивлении R_0 источника, например аккумулятора, сопротивление которого измеряется сотыми долями ома, напряжение на его зажимах в пределах допустимой нагрузки можно считать практически постоянным по величине.

2. Полной мощностью источника электрической энергии называют мощность, которую он развивает во всей цепи, т. е. как во внутренней, так и во внешней.

Рассмотрим зависимость полной мощности, развиваемой источником электрической энергии, от нагрузки.

Полная мощность, развиваемая источником электрической энергии в цепи, определяется следующей формулой:

$$P_0 = EI, \quad (76)$$

где P_0 — полная мощность, развиваемая источником электрической энергии, в ваттах;

E — электродвижущая сила в вольтах;

I — нагрузка в амперах.

Электродвижущая сила источника тока постоянна по величине, а поэтому, как следует из формулы (76), между полной мощностью P_0 и током I существует прямая пропорциональная (линейная) зависимость.

Следовательно, для построения графика зависимости полной мощности P_0 от нагрузки I необходимо определить две точки графика. Для этой цели опять воспользуемся режимами холостого хода и короткого замыкания источника электрической энергии.

а) При холостом ходе

$$I_{x.x} = 0.$$

Подставив величину тока холостого хода $I_{x.x}$ в формулу (76), получим полную мощность $P_{0x.x}$ при холостом ходе:

$$P_{0x.x} = EI_{x.x} = E \cdot 0 = 0,$$

т. е. полная мощность источника электрической энергии при холостом ходе равна нулю.

б) При коротком замыкании

$$I_{к.з} = \frac{E}{R_0}.$$

Подставив величину тока короткого замыкания $I_{к.з}$ в формулу (76), получим полную мощность $P_{0к.з}$ при коротком замыкании:

$$P_{0к.з} = EI_{к.з} = E \frac{E}{R_0} = \frac{E^2}{R_0},$$

т. е. при коротком замыкании полная мощность, развиваемая источником электрической энергии, максимальна.

На рис. 76 показан график зависимости полной мощности от нагрузки, развиваемой источником электрической энергии с постоянной электродвижущей силой и постоянным внутренним сопротивлением.

3. Полезной мощностью источника электрической энергии называется мощность, развиваемая им во внешнем сопротивлении.

Полезная мощность источника электрической энергии определяется формулой

$$P = UI, \quad (77)$$

где P — полезная мощность в ваттах;

U — напряжение на зажимах источника электрической энергии в вольтах;

I — ток в амперах.

Но, как известно,

$$U = E - IR_0,$$

а поэтому

$$P = (E - IR_0)I = EI - I^2 R_0. \quad (78)$$

Из полученной формулы следует, что полезная мощность P равна разности между полной мощностью $P_0 = EI$ и мощностью потерь внутри источника электрической энергии $P_{\text{внут}} = I^2 R_0$.

Как видно из формулы (78), зависимость полезной мощности P от нагрузки сложная и выражается она графически кривой, называемой параболой. Определим три характерные точки этой кривой, а именно точки, соответствующие режиму холостого хода, короткого замыкания и максимальной полезной мощности.

а) При холостом ходе

$$I_{x. x} = 0.$$

Подставляя величину тока холостого хода $I_{x. x}$ в формулу (78), находим

$$P_{x. x} = EI_{x. x} - I_{x. x}^2 R_0 = E \cdot 0 - 0 \cdot R_0 = 0,$$

т. е. полезная мощность источника электрической энергии при холостом ходе равна нулю.

б) При коротком замыкании

$$I_{к. з} = \frac{E}{R_0}.$$

Подставляя величину тока короткого замыкания $I_{к. з}$ в формулу (78), находим

$$P_{к. з} = EI_{к. з} - I_{к. з}^2 R_0 = E \frac{E}{R_0} - \frac{E^2}{R_0^2} R_0 = 0,$$

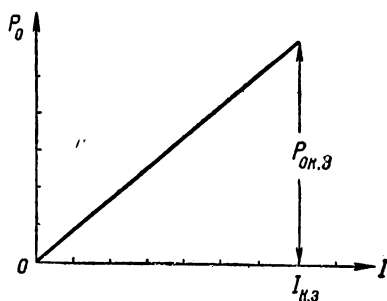


Рис. 76. График зависимости полной мощности P_0 от тока I

т. е. полезная мощность источника электрической энергии при коротком замыкании его равна нулю.

в) Основываясь на методах высшей математики, которыми мы здесь воспользоваться не имеем возможности, можно было бы доказать, что источник электрической энергии развивает максимальную полезную мощность в том случае, когда внешнее сопротивление R_1 цепи равно внутреннему сопротивлению R_0 , т. е. $R_1 = R_0$.

Величина тока в цепи для этого случая будет равна

$$I = \frac{E}{R_0 + R_1} = \frac{E}{2R_0} = \frac{I_{к.з}}{2},$$

т. е. источник электрической энергии развивает максимальную полезную мощность в том случае, когда его нагрузка равна половине тока короткого замыкания.

На рис. 77 показан график зависимости полезной мощности P от нагрузки I .

4. **Электрическим коэффициентом полезного действия** называется отношение полезной мощности к полной мощности источника электрической энергии, т. е.

$$\eta = \frac{P}{P_0}, \quad (79)$$

где η — электрический коэффициент полезного действия;

P — полезная мощность;

P_0 — полная мощность.

Выясним зависимость электрического коэффициента полезного действия η от нагрузки I источника электрической энергии. Для этого преобразуем формулу (79), подставив вместо P и P_0 соответствующие им выражения:

$$\eta = \frac{P}{P_0} = \frac{UI}{EI} = \frac{E - IR_0}{E} = 1 - \frac{IR_0}{E} = 1 - \frac{I}{\frac{E}{R_0}},$$

или, иначе,

$$\eta = 1 - \frac{I}{I_{к.з}}. \quad (80)$$

Из формулы (80) следует, что зависимость электрического коэффициента полезного действия η от нагрузки I линейная. Следовательно, график зависимости выражается прямой линией. Для построения этого графика определим величину η при холостом ходе и при коротком замыкании.

а) При холостом ходе

$$I_{х.х} = 0.$$

Подставляя величину тока холостого хода $I_{х. х}$ в формулу (80), находим, что

$$\eta_{х. х} = 1 - \frac{I_{х. х}}{I_{к. з}} = 1 - \frac{0}{I_{к. з}} = 1,$$

т. е. электрический коэффициент полезного действия при холостом ходе равен единице.

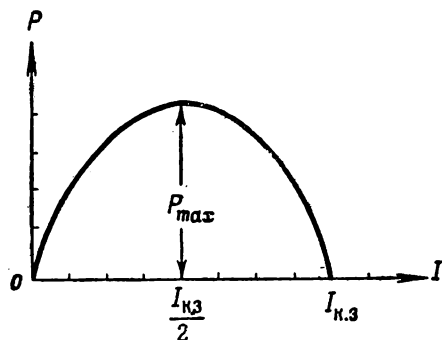


Рис. 77. График зависимости полезной мощности P от тока I

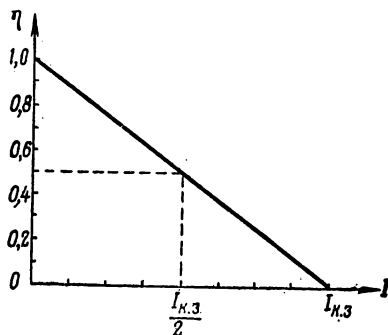


Рис. 78. График зависимости электрического коэффициента полезного действия η от тока I

Величину $\eta = 1$ при холостом ходе источника электрической энергии надо рассматривать как тот предел, к которому стремится отношение $\frac{P}{P_0}$ по мере уменьшения нагрузки источника. В пределе, когда $P \rightarrow 0$ и $P_0 \rightarrow 0$, их отношение стремится к единице, т. е. $\eta \rightarrow 1$.

б) При коротком замыкании

$$I_{к.з} = \frac{E}{R_0}.$$

Подставив величину тока короткого замыкания $I_{к.з}$ в формулу (80), получим

$$\eta_{к.з} = 1 - \frac{I_{к.з}}{I_{к.з}} = 1 - 1 = 0,$$

т. е. электрический коэффициент полезного действия при коротком замыкании источника электрической энергии равен нулю.

На рис. 78 показан график зависимости электрического коэффициента полезного действия η источника электрической энергии от нагрузки I .

При максимальной полезной мощности, развиваемой источником электрической энергии, ток в цепи $I = \frac{I_{к.з}}{2}$. Следовательно,

электрический коэффициент полезного действия в этом случае будет равен

$$\eta = 1 - \frac{I_{к.з}}{2} = 1 - 0,5 = 0,5, \text{ или } 50\%,$$

т. е. при максимальной полезной мощности, развиваемой источником электрической энергии, половину энергии, вырабатываемой им, он поглощает сам.

Напомним, что рассмотренные зависимости были исследованы для источника электрической энергии с постоянной электродвижущей силой и постоянным внутренним сопротивлением. К таким источникам можно отнести химические источники электрической энергии, например гальванические элементы и аккумуляторы. Для электрических машин эти соотношения иные, более сложные; о них будет сказано ниже, в разделе электрических машин.

ГЛАВА XI

ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНО И СМЕШАННО СОЕДИНЕННЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

§ 53. ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФА

В отличие от последовательной цепи в параллельной цепи электрический ток распределяется по нескольким направлениям.

На рис. 79 изображена схема параллельной цепи, состоящей из трех параллельно соединенных сопротивлений R_1 , R_2 и R_3 . Точки a и b этой цепи, к которым присоединены своими концами сопротивления, называются узловыми точками схемы.

Так как электрические заряды при своем движении по проводникам цепи нигде не накапливаются и нигде не теряются, то количество электричества, притекающего ежесекундно к любой узловой точке цепи, равно количеству электричества, утекающего от нее по параллельно соединенным сопротивлениям (ветвям). А это значит, что величина тока в проводе до узловой точки цепи должна равняться сумме величин токов, имеющих в параллельных ветвях, т. е. для схемы, изображенной на рис. 79, можно написать:

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3. \quad (81)$$

В справедливости последней формулы легко убедиться, измерив амперметром токи во всех участках параллельной цепи.

Формула (81) является математическим выражением **первого закона Кирхгофа**, который для общего случая формулируется так.

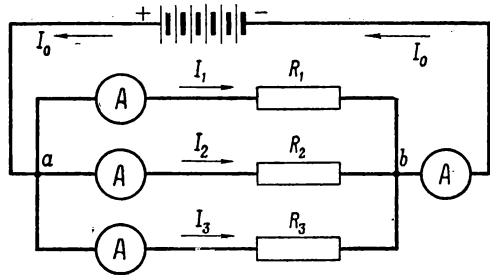


Рис. 79. Схема параллельной цепи с включенными в нее амперметрами

Сумма токов, притекающих к любой узловой точке параллельной цепи, равна сумме токов, утекающих от нее.

Если токи, притекающие к узловой точке цепи, условно считать положительными, а утекающие от нее — отрицательными, то первый закон Кирхгофа можно сформулировать так.

Алгебраическая сумма токов, притекающих к точке разветвления, равна нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots = 0, \quad (82)$$

или, иначе,

$$\Sigma I = 0,$$

где ΣI — алгебраическая сумма токов.

Пример 52. К узловой точке цепи притекают токи $I_1 = 3$ а, $I_2 = 5$ а и утекают от нее токи $I_3 = 1,5$ а, $I_4 = 4,5$ а и I_5 . Требуется определить ток I_5 .

Решение. По закону Кирхгофа

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5,$$

или

$$3 + 5 = 1,5 + 4,5 + I_5,$$

откуда находим

$$I_5 = 2 \text{ а.}$$

Если эту задачу решать, исходя из формулы (82), то мы должны положить, что $I_1 = 3$ а; $I_2 = 5$ а; $I_3 = -1,5$ а и $I_4 = -4,5$ а и тогда

$$\Sigma I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = 0,$$

или

$$3 + 5 - 1,5 - 4,5 + I_5 = 0,$$

откуда

$$I_5 = -2 \text{ а,}$$

т. е. ток I_5 утекает от точки разветвления.

§ 54. НАПРЯЖЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Если сопротивлениями проводов, идущих от источника электрической энергии к узловым точкам параллельной цепи, можно пренебречь, то напряжения на зажимах параллельно соединенных сопротивлений должны быть равны друг другу и равны напряжению на зажимах источника электрической энергии, т. е.

$$U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U, \quad (83)$$

где U_1, U_2 и т. д. — напряжения на отдельных параллельно соединенных сопротивлениях (потребителях);
 U — напряжение на зажимах источника электрической энергии.

В справедливости формулы (83) можно убедиться при помощи вольтметров, включенных в цепь согласно рис. 80.

Если же сопротивлением проводов, идущих от источника электрической энергии к параллельно соединенным потреби-

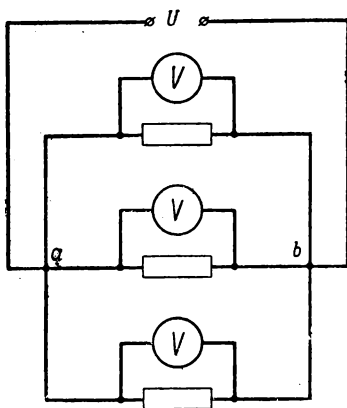


Рис. 80. Схема параллельной цепи с включенными в нее вольтметрами

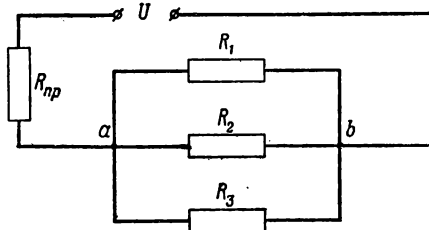


Рис. 81. Схема параллельной цепи, в которой неразветвленный участок обладает некоторым сопротивлением

лям, пренебречь нельзя (рис. 81), то напряжение на зажимах параллельно соединенных потребителей будет меньше, чем на зажимах источника электрической энергии, на величину падения напряжения в проводах, т. е.

$$U_1 = U_2 = U_3 = U - IR_{пр}, \quad (84)$$

где I — ток в соединительных (подводящих) проводах;
 $R_{пр}$ — сопротивление соединительных проводов.

Пример 53. Генератор, обладающий электродвижущей силой $E = 130$ в и внутренним сопротивлением $R_0 = 0,3$ ом, питает токком три параллельно соединенных потребителя, потребляющих токи, соответственно равные $I_1 = 2$ а, $I_2 = 3$ а и $I_3 = 5$ а. Определить напряжение на зажимах генератора и напряжения на зажимах потребителей, если сопротивление подводящих проводов $R_{пр} = 0,2$ ом.

Решение. Ток I в подводящих проводах согласно первому закону Кирхгофа равен

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 2 + 3 + 5 = 10 \text{ а.}$$

Падение напряжения внутри генератора

$$U_0 = IR_0 = 10 \cdot 0,3 = 3 \text{ в.}$$

Напряжение на зажимах генератора

$$U = E - U_0 = 130 - 3 = 127 \text{ в.}$$

Падение напряжения в подводящих проводах

$$U_{\text{пр}} = IR_{\text{пр}} = 10 \cdot 0,2 = 2 \text{ в.}$$

Напряжение на приемниках

$$U_1 = U_2 = U_3 = U - U_{\text{пр}} = 127 - 2 = 125 \text{ в.}$$

§ 55. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ В ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

Напряжения на зажимах параллельно соединенных сопротивлений (потребителей) равны друг другу, если они присоединены к одним и тем же узловым точкам схемы:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U.$$

Отсюда следует, что если сопротивления параллельно соединенных потребителей различны, то токи в них согласно закону Ома должны быть также различными:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2} \text{ и } I_3 = \frac{U}{R_3}.$$

Разделив последние равенства поочередно друг на друга, получим

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}; \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{R_3}{R_2} \text{ и } \frac{I_3}{I_1} = \frac{R_1}{R_3}, \quad (85)$$

т. е. токи в параллельно соединенных потребителях распределяются обратно пропорционально величинам их сопротивлений.

Это значит, что во сколько раз первое сопротивление больше второго, во столько раз ток во втором сопротивлении больше, чем в первом, и т. д.

В справедливости формулы (85) легко убедиться при помощи амперметров, включенных в параллельные ветви.

Пример 54. Цепь составлена из двух параллельно соединенных сопротивлений $R_1 = 12 \text{ ом}$ и $R_2 = 5 \text{ ом}$. Определить ток в первом из них, если во втором ток $I_2 = 24 \text{ а}$.

Решение. По формуле (85) находим

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1},$$

откуда

$$I_1 = \frac{I_2 R_2}{R_1} = \frac{24 \cdot 5}{12} = 10 \text{ а.}$$

Допустим, что ток I_0 разветвляется по двум параллельно соединенным сопротивлениям R_1 и R_2 . Определим токи I_1 и I_2 в этих сопротивлениях, выразив их через общий ток I_0 .

Согласно формуле (85)

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Прибавив к правой и левой частям этой пропорции по единице, получим

$$\frac{I_1}{I_2} + 1 = \frac{R_2}{R_1} + 1,$$

или, иначе,

$$\frac{I_1 + I_2}{I_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_1}.$$

Но согласно первому закону Кирхгофа

$$I_1 + I_2 = I_0,$$

а поэтому

$$\frac{I_0}{I_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1},$$

откуда находим

$$I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I_0. \quad (86)$$

Аналогично для тока I_1 получим

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_0.$$

§ 56. ЭКВИВАЛЕНТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ НЕСКОЛЬКИХ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Пусть задана цепь постоянного тока, состоящая из трех параллельно соединенных потребителей, обладающих сопротивлениями R_1 , R_2 и R_3 . Определим общее сопротивление этих потребителей.

Если пренебречь падением напряжения в подводящих проводах, то напряжения на зажимах всех потребителей будут равны друг другу и напряжению на зажимах всей цепи, т. е.

$$U_1 = U_2 = U_3 = U.$$

Токи во всех параллельных ветвях можно определить по закону Ома:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3}.$$

Применяя первый закон Кирхгофа к любой из узловых точек цепи, можем написать, что

$$I_0 = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3},$$

где I_0 — общий ток (ток в неразветвленном участке цепи).

Если эквивалентное сопротивление всей цепи равно R , то согласно закону Ома

$$I_0 = \frac{U}{R}$$

и вместо последнего равенства можем написать

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}.$$

Разделив все члены последнего равенства на U , получим

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \quad (87)$$

Но, как известно,

$$\frac{1}{R_1} = G_1 \text{ — проводимость первой ветви;}$$

$$\frac{1}{R_2} = G_2 \text{ — проводимость второй ветви;}$$

$$\frac{1}{R_3} = G_3 \text{ — проводимость третьей ветви;}$$

$$\frac{1}{R} = G \text{ — эквивалентная проводимость всей цепи.}$$

Принимая во внимание последние выражения, вместо формулы (87) можем написать

$$G = G_1 + G_2 + G_3, \quad (88)$$

т. е. эквивалентная проводимость нескольких параллельно соединенных потребителей равна сумме их проводимостей.

После того как по формуле (88) найдена эквивалентная проводимость G , нетрудно определить эквивалентное сопротивление по формуле

$$R = \frac{1}{G}. \quad (89)$$

Пример 55. Определить эквивалентное сопротивление четырех параллельно соединенных потребителей, обладающих сопротивлениями $R_1 = 2$ ом, $R_2 = 6$ ом, $R_3 = 4$ ом, $R_4 = 3$ ом.

Решение. По формуле (87) находим

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} + \frac{1}{4} + \frac{1}{3} = \frac{5}{4},$$

откуда определяем эквивалентное сопротивление

$$R = \frac{1}{\frac{1}{5}} = \frac{4}{5} = 0,8 \text{ ом.}$$

В частном случае, если заданы только два параллельно соединенных потребителя, обладающих сопротивлениями R_1 и R_2 ,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2},$$

откуда

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (90)$$

т. е. эквивалентное сопротивление двух параллельно соединенных потребителей равно произведению их сопротивлений, разделенному на их сумму.

Пример 56. Соединены параллельно два потребителя, имеющих сопротивления $R_1 = 0,6 \text{ ом}$, $R_2 = 0,3 \text{ ом}$. Определить эквивалентное сопротивление этих потребителей.

Решение. По формуле (90) находим

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{0,6 \cdot 0,3}{0,6 + 0,3} = 0,2 \text{ ом.}$$

Если несколько параллельно соединенных потребителей имеют одинаковые сопротивления, т. е.

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n,$$

то согласно формуле (87)

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_1} = \frac{n}{R_1},$$

где n — число всех параллельно соединенных потребителей.

Из последнего равенства получим, что

$$R = \frac{R_1}{n}, \quad (91)$$

т. е. эквивалентное сопротивление нескольких одинаковых параллельно соединенных потребителей равно сопротивлению одного из потребителей, деленному на число их.

Пример 57. Параллельно соединено $n = 5$ ламп по $R_1 = 400 \text{ ом}$ каждая. Определить эквивалентное сопротивление всех ламп.

Решение. По формуле (91) находим

$$R = \frac{R_1}{n} = \frac{400}{5} = 80 \text{ ом.}$$

Следует отметить, что при параллельном соединении нескольких потребителей их эквивалентное сопротивление всегда будет меньше наименьшего из сопротивлений, имеющегося в данном соединении.

§ 57. ПОТЕНЦИОМЕТР

В тех случаях когда для потребителей необходимо взять от источника электрической энергии определенную часть напряжения, применяются приборы, называемые **потенциометрами**.

В простейшем случае в качестве потенциометра может быть использован обычный ползунковый реостат. На рис. 82 показана схема включения потенциометра в цепь. Проволока потенциометра через зажимы (точки *a* и *b* на схеме) подключается к зажимам источника электрической энергии (под полное напряжение). К потребителю же от потенциометра подаются два провода, из которых один присоединен к одному из концов про-

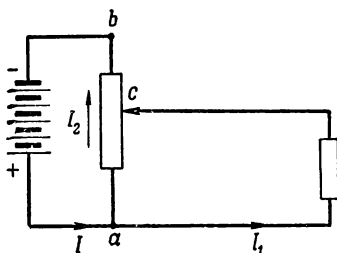


Рис. 82. Схема включения потенциометра в цепь

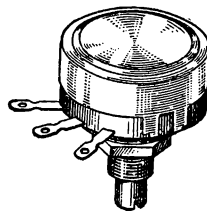


Рис. 83. Внешний вид потенциометра, применяемого в радиотехнике

локи потенциометра (точка *a* на схеме), а другой — к подвижному контакту *c* последнего. Тогда, если на концах проволоки потенциометра имеется полное напряжение источника электрической энергии, на концах проводов, подающих напряжение к потребителю, будет только часть этого напряжения. Величина последнего зависит от того, в каком положении установлен подвижный контакт *c* потенциометра. Если он находится в точке *b*, то потребитель получит максимальное возможное напряжение, если же он находится в точке *a*, то напряжение у потребителя будет равно нулю.

На рис. 83 показан внешний вид потенциометра, применяемого в радиотехнике.

§ 58. ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА СО СМЕШАННО СОЕДИНЕННЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ И ОДНИМ ИСТОЧНИКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электрическая цепь, в которой имеются участки с последовательным и параллельным соединением сопротивлений, называется цепью со смешанно соединенными сопротивлениями или

просто смешанной цепью. На рис. 84 изображена смешанная цепь, состоящая из участков ab , bc и de , соединенных последовательно друг с другом; одновременно с этим участки bc и de состоят каждый в отдельности из совокупности нескольких параллельно соединенных сопротивлений.

Смешанная цепь, питаемая одним источником электрической энергии, обычно рассчитывается методом последовательного упрощения схемы, т. е. данная смешанная цепь преобразуется в более простую, эквивалентную ей схему.

Отметим, что эквивалентной схемой по отношению

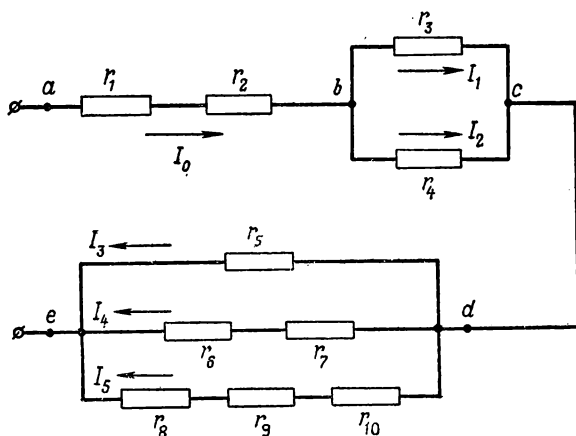


Рис. 84. Схема смешанно соединенных сопротивлений

к данной реальной схеме называется такая схема, в которой источник электрической энергии создает такой же ток и развивает такую же мощность, что и в данной реальной схеме.

После преобразования смешанной цепи в более простую эквивалентную схему определение режима в цепи значительно упрощается и обычно сводится к применению закона Ома для последовательной цепи.

Рассмотрим применение метода последовательного упрощения схемы к расчету смешанной цепи, схема которой представлена на рис. 84. Допустим, что в заданной смешанной цепи нам известны напряжение U , приложенное ко всей цепи, и все сопротивления, имеющиеся в этой цепи. Требуется определить токи: I_0 , I_1 , I_2 , I_3 , I_4 и I_5 .

Решение. В данной смешанной цепи три участка: ab , bc и de , соединенные между собой последовательно.

Определим эквивалентные сопротивления участков ab , bc и de смешанной цепи, применяя уже известные правила расчета последовательной и параллельной цепей.

Для участка цепи ab

$$R_{ab} = r_1 + r_2.$$

Для участка цепи bc

$$\frac{1}{R_{bc}} = \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}.$$

Решив последнее уравнение относительно R_{bc} , найдем эквивалентное сопротивление участка цепи bc .

Для участка цепи de

$$\frac{1}{R_{de}} = \frac{1}{r_5} + \frac{1}{r_6 + r_7} + \frac{1}{r_8 + r_9 + r_{10}}.$$

Решив это уравнение относительно R_{de} , определим эквивалентное сопротивление участка цепи de .

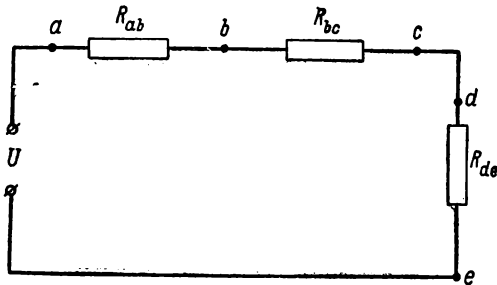


Рис. 85. Схема, эквивалентная цепи, изображенной на рис. 84

Теперь мы можем перейти к эквивалентной цепи, состоящей из совокупности трех последовательно соединенных сопротивлений: R_{ab} , R_{bc} и R_{de} (рис. 85).

Применив формулу закона Ома для последовательной цепи, определим ток I_0 в ней, а следовательно, и ток I_0 в неразветвленном участке данной смешанной цепи, так как по условию эквивалентности схем эти токи должны быть одинаковыми по величине.

Итак,

$$I_0 = \frac{U}{R_{ab} + R_{bc} + R_{de}}.$$

Определив ток I_0 , найдем падение напряжения на участках ab , bc и de эквивалентной схемы:

$$U_{ab} = I_0 R_{ab}; \quad U_{bc} = I_0 R_{bc}; \quad U_{de} = I_0 R_{de}.$$

Но в силу эквивалентности рассматриваемых нами схем напряжение U_{ab} в эквивалентной схеме равно напряжению U_{ab} в смешанной цепи и т. д.

Зная напряжения на участках смешанной цепи, легко определить токи в параллельных ветвях этих участков:

$$I_1 = \frac{U_{bc}}{r_3}; \quad I_2 = \frac{U_{bc}}{r_4};$$

$$I_3 = \frac{U_{de}}{r_6}; \quad I_4 = \frac{U_{de}}{r_6 + r_7}; \quad I_5 = \frac{U_{de}}{r_8 + r_9 + r_{10}}.$$

Определив искомые токи, можно проверить правильность решения задач, применив первый закон Кирхгофа. Для рассматриваемой смешанной цепи должно удовлетворяться следующее соотношение:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5 = I_0.$$

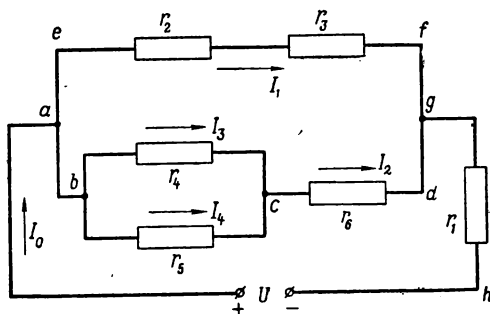


Рис. 86. Схема смешанного соединения сопротивлений

Пример 58. Определить токи во всех участках смешанной цепи (рис. 86) и общую мощность, развиваемую током в цепи, если напряжение источника электрической энергии $U = 30$ в, сопротивление $r_1 = 1$ ом, $r_2 = 1$ ом, $r_3 = 5$ ом, $r_4 = 6$ ом, $r_5 = 3$ ом, $r_6 = 10$ ом.

Решение. Рассматриваемая цепь состоит из двух последовательно соединенных участков цепи ag и gh . В свою очередь участок цепи ag состоит из двух параллельных ветвей ef и bd .

Будем решать задачу методом последовательного упрощения схемы.

Определим эквивалентное сопротивление участка ag смешанной цепи. Для этой цели вначале определим эквивалентные сопротивления его параллельных ветвей ef и bd :

$$R_{ef} = r_2 + r_3 = 1 + 5 = 6 \text{ ом};$$

$$R_{bd} = \frac{r_4 r_5}{r_4 + r_5} + r_6 = \frac{6 \cdot 3}{6 + 3} + 10 = 12 \text{ ом}.$$

Теперь мы можем определить эквивалентное сопротивление участка ag смешанной цепи:

$$R_{ag} = \frac{R_{ef} R_{bd}}{R_{ef} + R_{bd}} = \frac{6 \cdot 12}{6 + 12} = 4 \text{ ом}.$$

Эквивалентное сопротивление всей смешанной цепи равно

$$R_{ah} = R_{ag} + R_{gh} = 4 + 1 = 5 \text{ ом.}$$

Определяем ток I_0 в неразветвленном участке смешанной цепи:

$$I_0 = \frac{U}{R_{ah}} = \frac{30}{5} = 6 \text{ а.}$$

Определяем напряжение U_{ag} :

$$U_{ag} = U - I_0 r_1 = 30 - 6 \cdot 1 = 24 \text{ в.}$$

Определяем ток I_1 , протекающий через сопротивления r_2 и r_3 :

$$I_1 = \frac{U_{ag}}{R_{ef}} = \frac{24}{6} = 4 \text{ а.}$$

Определяем ток I_2 , протекающий через сопротивление r_6 :

$$I_2 = \frac{U_{ag}}{R_{bd}} = \frac{24}{12} = 2 \text{ а.}$$

Определяем напряжение U_{bc} :

$$U_{bc} = U_{ag} - I_2 r_6 = 24 - 2 \cdot 10 = 4 \text{ в.}$$

Определяем ток I_3 , протекающий через сопротивление r_4 :

$$I_3 = \frac{U_{bc}}{r_4} = \frac{4}{6} = 0,66 \text{ а.}$$

Определяем ток I_4 , протекающий через сопротивление r_5 :

$$I_4 = \frac{U_{bc}}{r_5} = \frac{4}{3} = 1,33 \text{ а.}$$

Общая мощность, развиваемая током в смешанной цепи, равна

$$P_0 = UI_0 = 30 \cdot 6 = 180 \text{ вт.}$$

ГЛАВА XII

СЛОЖНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 59. ВТОРОЙ ЗАКОН КИРХГОФА

Сложной цепью постоянного тока называется такая электрическая цепь, которая состоит из совокупности замкнутых на себя контуров, электрически связанных друг с другом. На участках каждого отдельного замкнутого контура сложной цепи в общем случае протекают разные по величине токи и имеются те или иные электродвижущие силы.

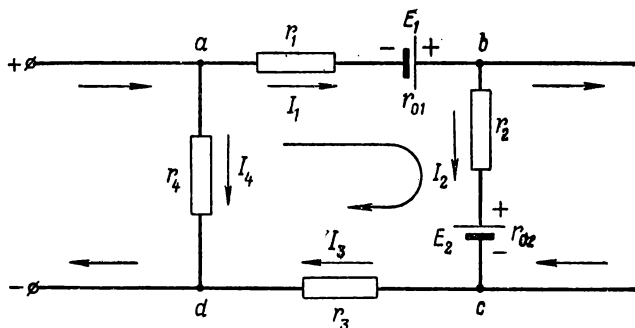


Рис. 87. Замкнутый контур $abcda$ сложной цепи

На рис. 87 показан замкнутый контур $abcda$, выделенный из некоторой сложной цепи постоянного тока. Этот контур состоит из четырех участков (ab , bc , cd и da), в каждом из которых имеются сопротивления, а в некоторых из них — и электродвижущие силы.

Допустим, в данном контуре токи протекают в направлениях, отмеченных стрелками, т. е. ток I_1 течет от точки a к точке b , ток I_2 — от точки b к точке c и т. д. Полярность источников тока обозначена здесь, как и всегда, знаками плюс и минус, где знак плюс отмечает положительный полюс источника тока, а знак минус — отрицательный.

Проследим за тем, как изменяется потенциал в данном контуре, если мы будем обходить этот контур, начиная с точки a и кончая ею же. Будем совершать свой обход в направлении движения часовой стрелки, т. е. в направлении изогнутой стрелки, показанной внутри контура. Обходя участок ab , мы должны будем поочередно пройти по сопротивлению r_1 и источнику электрической энергии с электродвижущей силой E_1 и внутренним сопротивлением r_{01} . Проходя по сопротивлению r_1 , мы отметим падение потенциала в нем на величину $I_1 r_1$, так как здесь обход совершается в направлении тока, а ток, как известно, течет в направлении падения потенциала. Далее, проходя через источник электрической энергии, мы отметим падение потенциала в его внутреннем сопротивлении r_{01} на величину $I_1 r_{01}$ и, кроме того, возрастание потенциала на величину, равную электродвижущей силе E_1 , так как мы проходим внутри источника в направлении его действия, т. е. от минус-зажима к плюс-зажиму его. Следовательно, потенциал в точке b будет равен

$$\varphi_b = \varphi_a - I_1 r_1 - I_1 r_{01} + E_1, \quad (\text{A})$$

где φ_a — потенциал точки a ;
 φ_b — потенциал точки b .

Далее, при переходе от узловой точки b к узловой точке c на участке bc отметим падение потенциала в сопротивлении r_2 на величину $I_2 r_2$, падение потенциала на внутреннем сопротивлении r_{02} источника на величину $I_2 r_{02}$ и, наконец, падение потенциала внутри источника на величину, равную его электродвижущей силе E_2 , так как здесь мы проходим внутри источника от плюс-зажима к минус-зажиму его, т. е. навстречу действию его электродвижущей силы E_2 . Следовательно, потенциал в точке c будет равен

$$\varphi_c = \varphi_b - I_2 r_2 - I_2 r_{02} - E_2. \quad (\text{Б})$$

При переходе от узловой точки c к узловой точке d отметим падение потенциала в сопротивлении r_3 на величину $I_3 r_3$, так как здесь мы идем через сопротивление r_3 в направлении тока I_3 , т. е. в направлении падения потенциала. Следовательно, потенциал в точке d будет равен

$$\varphi_d = \varphi_c - I_3 r_3. \quad (\text{В})$$

И, наконец, при переходе от узловой точки d к исходной узловой точке a отметим повышение потенциала в сопротивлении r_4 на величину $I_4 r_4$, так как здесь мы идем навстречу току I_4 , т. е. в направлении возрастания потенциала. Следовательно, потенциал в точке a будет равен

$$\varphi_a = \varphi_d + I_4 r_4. \quad (\text{Г})$$

Сложив уравнения (А), (Б), (В) и (Г), получим:

$$\varphi_b + \varphi_c + \varphi_d + \varphi_a = \varphi_a - I_1 r_1 - I_1 r_{01} + E_1 + \\ + \varphi_b - I_2 r_2 - I_2 r_{02} - E_2 + \varphi_c - I_3 r_3 + \varphi_d + I_4 r_4,$$

или, после несложных преобразований:

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 + I_1 r_{01} + I_2 r_2 + I_2 r_{02} + I_3 r_3 - I_4 r_4.$$

Полученное нами уравнение выражает математически связь между электродвижущими силами и падением напряжения на отдельных участках замкнутого контура (на отдельных сопротивлениях).

Если токи и электродвижущие силы, совпадающие с направлением обхода по контуру, считать положительными, а направленные навстречу обходу — отрицательными, то последнее уравнение можно записать так:

$$E_1 + (-E_2) = I_1 r_1 + I_1 r_{01} + I_2 r_2 + I_2 r_{02} + I_3 r_3 + (-I_4 r_4)$$

или в сокращенной записи

$$\Sigma E = \Sigma I r. \quad (92)$$

Полученное нами уравнение является математическим выражением одного из важнейших законов электротехники, называемого вторым законом Кирхгофа.

Второй закон Кирхгофа может быть сформулирован так: алгебраическая сумма электродвижущих сил, имеющих в замкнутом контуре, равна алгебраической сумме падения напряжения во всех сопротивлениях, входящих в этот контур.

Второй закон Кирхгофа справедлив для любого замкнутого контура и, в частности, для контура, не содержащего в себе электродвижущих сил. В этом случае уравнение согласно второму закону Кирхгофа запишем так:

$$\Sigma I r = 0,$$

т. е. алгебраическая сумма падения напряжения в данном замкнутом контуре равна нулю.

§ 60. ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ КИРХГОФА К РАСЧЕТУ СЛОЖНЫХ ЦЕПЕЙ

Рассчитать сложную цепь — это значит определить режим в этой цепи, т. е. по заданным электродвижущим силам и сопротивлениям ее отыскать величины и направления токов в отдельных участках цепи. Может быть поставлена и обратная задача: по заданным одному — двум токам и сопротивлениям сложной цепи определить некоторые электродвижущие силы и падения напряжения в цепи и т. д.

В настоящем параграфе мы рассмотрим применение метода уравнений Кирхгофа к расчету сложной цепи.

Допустим, что задана сложная цепь (рис. 88), состоящая из двух источников электрической энергии, обладающих электродвижущими силами E_1 и E_2 и соответственно внутренними сопротивлениями r_1 и r_2 . К этим

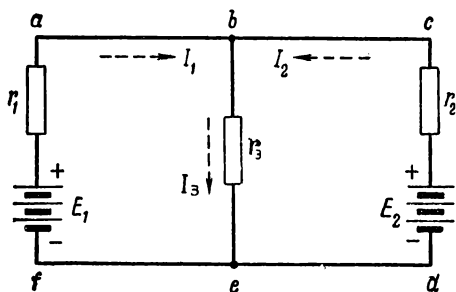


Рис. 88. Схема сложной цепи

источникам подключен потребитель, обладающий сопротивлением r_3 . Требуется определить режим в данной цепи, т. е. найти величины и направления токов во всех ее участках.

Для решения данной задачи применим метод уравнений Кирхгофа, т. е. уравнений, составленных согласно первому и второму законам Кирхгофа. Для этой

цели необходимо составить столько уравнений, сколько в данной сложной цепи имеется неизвестных токов. Так как неизвестных токов в данной цепи мы имеем три: ток I_1 в участке цепи с источником электрической энергии, обладающим электродвижущей силой E_1 , ток I_2 в участке цепи с источником, обладающим электродвижущей силой E_2 , и ток I_3 в потребителе с сопротивлением r_3 , — то необходимо составить систему из трех уравнений. Вообще для любой сложной схемы и, в частности, для заданной можно составить число уравнений больше числа неизвестных токов. Однако некоторые из этих уравнений, как правило, не будут независимыми, т. е. они будут следствием остальных уравнений. Для того чтобы все уравнения были независимыми, рекомендуется при их составлении придерживаться следующих правил:

1. Если сложная цепь имеет n узловых точек, то можно составить согласно первому закону Кирхгофа $(n - 1)$ независимых уравнений, так как уравнение для остающейся n -й узловой точки уже будет следствием первых $(n - 1)$ уравнений, т. е. оно не будет независимым.

2. Недостающее число уравнений составляется согласно второму закону Кирхгофа. Чтобы все эти уравнения были независимыми, т. е. каждое из них не было следствием других, необходимо выбирать такие контуры для составления уравнений, чтобы каждый из них отличался от других по меньшей мере одним новым участком цепи (одной ветвью).

При составлении уравнений согласно законам Кирхгофа необходимо знать направления токов. Но направления этих токов, а также и их величины нам неизвестны. Однако это затруднение отпадает, если принять во внимание, что ток является

алгебраической величиной, т. е. если ток одного направления на данном участке цепи положителен, то ток противоположного направления на этом участке отрицателен.

Следовательно, прежде чем приступить к решению данной задачи, необходимо задаться положительными токами на всех участках сложной цепи, указав на схеме направления положительных токов стрелками, например пунктирными, как это показано на схеме (рис. 88). Тогда, если в результате решения данной задачи некоторый ток I_1 окажется положительной величиной ($I_1 > 0$), то это значит, что он течет в ту сторону, куда показывает пунктирная стрелка. Если же, наоборот, ток I_1 окажется отрицательной величиной ($I_1 < 0$), значит, он течет в противоположном направлении.

Составляя уравнения согласно второму закону Кирхгофа, мы должны иметь дело с электродвижущими силами и падением напряжения на отдельных участках цепи как величинами алгебраическими. Когда же электродвижущие силы и падение напряжения считать положительными и когда отрицательными?

Прежде всего алгебраический знак падения напряжения на любом участке цепи зависит от положительного направления тока на этом участке. Если, обходя по контуру, мы будем проходить по данному участку цепи в направлении, совпадающем с положительным направлением тока (в направлении пунктирной стрелки), то падение напряжения на этом участке будем принимать за положительную величину. Наоборот, мы его будем принимать за отрицательную величину, если будем проходить по данному участку цепи в направлении, противоположном направлению положительного тока (навстречу пунктирной стрелки). Что касается знака электродвижущей силы, то он зависит от того, в каком направлении мы будем при обходе по данному контуру проходить через источник электрической энергии. Если при обходе по контуру мы будем входить в источник электрической энергии со стороны его отрицательного полюса и выходить со стороны положительного полюса, то его электродвижущую силу будем считать положительной. Наоборот, если при обходе по контуру мы будем входить в источник электродвижущей энергии со стороны его положительного полюса, а выходить со стороны отрицательного, то его электродвижущую силу будем считать отрицательной.

В заключение отметим, что направление обхода по контуру можно выбирать произвольно. Например, по одному из контуров можно совершать обход в направлении вращения часовой стрелки, а по другому — в противоположном направлении. В каком бы

направлении мы ни обходим контур, по движению часовой стрелки или против него, в любом случае получим тождественные уравнения.

Условившись относительно того, когда токи, падения напряжений и электродвижущие силы считать положительными и когда отрицательными, можно приступить к составлению уравнений согласно законам Кирхгофа.

В заданной схеме сложной цепи (рис. 88) имеются две узловые точки, b и e . Следовательно, мы можем составить только одно уравнение согласно первому закону Кирхгофа, например, для узловой точки b . Остальные же два уравнения необходимо составить согласно второму закону Кирхгофа. Для этой цели выбираем два контура, $abeja$ и $bcdeb$. Они дадут возможность составить два независимых уравнения, так как эти контуры отличаются друг от друга некоторыми своими участками: например, в контуре $abeja$ имеется сопротивление r_1 , а в контуре $bcdeb$ его нет.

Задавшись положительными направлениями токов, для узловой точки b составим уравнение согласно первому закону Кирхгофа:

$$I_1 + I_2 = I_3. \quad (\text{I})$$

Обходя контур $abeja$ в направлении движения часовой стрелки, составим уравнение согласно второму закону Кирхгофа:

$$E_1 = I_1 r_1 + I_3 r_3. \quad (\text{II})$$

Обходя контур $bcdeb$ в направлении против движения часовой стрелки, составим уравнение согласно второму закону Кирхгофа:

$$E_2 = I_2 r_2 + I_3 r_3. \quad (\text{III})$$

Итак, мы имеем систему из трех уравнений первой степени с тремя неизвестными (тремя токами: I_1 , I_2 и I_3), которую можно решать приемами элементарной алгебры.

Решив эти уравнения, т. е. выяснив величины и направления реальных (истинных) токов в схеме, обозначим эти направления стрелками (в нашем примере сплошными в отличие от пунктирных, которыми были обозначены положительные направления токов).

Проверить правильность решения задачи можно путем подстановки полученных значений токов I_1 , I_2 и I_3 в уравнения, составленные согласно законам Кирхгофа. Если полученные решения удовлетворяют этим уравнениям, то задача решена правильно.

Пример 59. Задана сложная электрическая цепь (рис. 88), в которой один источник электрической энергии имеет электродвижущую силу $E_1 = 24$ в, а другой $E_2 = 18$ в. В участке цепи с электродвижущей силой E_1 имеется

сопротивление $r_1 = 4$ ом, а в участках цепи с электродвижущей силой E_2 — сопротивление $r_2 = 6$ ом. Требуется определить режим в этой цепи для трех вариантов: 1) для случая, когда потребитель имеет сопротивление $r_3 = 4$ ом; 2) для $r_3 = 12$ ом и 3) для $r_3 = 16$ ом.

Решение. Так как нам необходимо решить данную задачу в нескольких вариантах, то целесообразно ее решить вначале в общем виде.

Составляем систему трех уравнений для определения трех неизвестных токов: I_1 , I_2 и I_3 , применяя для этой цели законы Кирхгофа.

Для узловой точки b

$$I_1 + I_2 = I_3. \quad (\text{I})$$

Для контура $abefa$

$$E_1 = I_1 r_1 + I_3 r_3 \quad (\text{II})$$

Для контура $bcdeb$

$$E_2 = I_2 r_2 + I_3 r_3. \quad (\text{III})$$

Подставив выражение для тока I_3 из уравнения (I) в уравнения (II) и (III), получим следующие два уравнения:

$$E_1 = I_1 r_1 + (I_1 + I_2) r_3 = I_1 (r_1 + r_3) + I_2 r_3; \quad (\text{II}')$$

$$E_2 = I_2 r_2 + (I_1 + I_2) r_3 = I_1 r_3 + I_2 (r_2 + r_3). \quad (\text{III}')$$

Умножим левую и правую части уравнения (II') на $(r_2 + r_3)$, а левую и правую части уравнения (III') — на r_3 и после этого вычтем из первого уравнения второе:

$$\begin{array}{r} E_1 (r_2 + r_3) = I_1 (r_1 + r_3) (r_2 + r_3) + I_2 r_3 (r_2 + r_3) \\ E_2 r_3 = I_1 r_3^2 + I_2 (r_2 + r_3) r_3 \\ \hline E_1 (r_2 + r_3) - E_2 r_3 = I_1 (r_1 + r_3) (r_2 + r_3) - I_1 r_3^2 \end{array},$$

или

$$E_1 (r_2 + r_3) - E_2 r_3 = I_1 (r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1 + r_3^2 - r_3^2),$$

откуда находим, что

$$I_1 = \frac{E_1 (r_2 + r_3) - E_2 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1}. \quad (\text{IV})$$

Аналогично этому, умножив уравнение (II') на r_3 , а уравнение (III') — на $(r_1 + r_3)$ и вычтя из первого второе, получим уравнение, из которого найдем, что

$$I_2 = \frac{E_2 (r_1 + r_3) - E_1 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1}. \quad (\text{V})$$

И наконец, подставив выражения для токов I_1 и I_2 в уравнение (I), найдем величину тока I_3 :

$$I_3 = I_1 + I_2 = \frac{E_1 (r_2 + r_3) - E_2 r_3 + E_2 (r_1 + r_3) - E_1 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1},$$

или

$$I_3 = \frac{E_1 r_2 + E_2 r_1}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1}. \quad (\text{VI})$$

Для первого варианта задачи $E_1 = 24$ в, $E_2 = 18$ в, $r_1 = 4$ ом, $r_2 = 6$ ом и $r_3 = 4$ ом.

Подставив в формулы (IV), (V) и (VI) значения данных величин, получим:

$$I_1 = \frac{E_1 (r_2 + r_3) - E_2 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} = \frac{24(6 + 4) - 18 \cdot 4}{4 \cdot 6 + 6 \cdot 4 + 4 \cdot 4} = 2,625 \text{ а};$$

$$I_2 = \frac{E_2 (r_1 + r_3) - E_1 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} = \frac{18(4 + 4) - 24 \cdot 4}{4 \cdot 6 + 6 \cdot 4 + 4 \cdot 4} = 0,75 \text{ а};$$

$$I_3 = \frac{E_1 r_2 + E_2 r_1}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} = \frac{24 \cdot 6 + 18 \cdot 4}{4 \cdot 6 + 6 \cdot 4 + 4 \cdot 4} = 3,375 \text{ а}.$$

Все токи получились положительными, а это значит, что они текут в направлениях, указанных пунктирными стрелками. На основании этого можно сделать вывод, что оба источника электрической энергии работают в данном случае в режиме генераторов, питая ток $I_3 = 3,375$ а потребитель с сопротивлением r_3 . При этом на долю первого источника приходится ток $I_1 = 2,625$ а, а на долю второго — ток $I_2 = 0,75$ а, поскольку

$$I_1 + I_2 = 2,625 + 0,75 = 3,375 \text{ а} = I_3.$$

Правильность решения задачи можно проверить путем подстановки полученных значений токов в исходные уравнения, например в уравнение (II):

$$E_1 = I_1 r_1 + I_3 r_3, \text{ или, иначе, } 24 = 2,625 \cdot 4 + 3,375 \cdot 4 = 24,$$

т. е. задача решена правильно.

Для второго варианта задачи $E_1 = 24$ в, $E_2 = 18$ в, $r_1 = 4$ ом, $r_2 = 6$ ом и $r_3 = 12$ ом.

Применяя формулы (IV), (V) и (VI), получим:

$$I_1 = \frac{E_1 (r_2 + r_3) - E_2 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} = \frac{24(6 + 12) - 18 \cdot 12}{4 \cdot 6 + 6 \cdot 12 + 12 \cdot 4} = 1,43 \text{ а};$$

$$I_2 = \frac{E_2 (r_1 + r_3) - E_1 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} = \frac{18(4 + 12) - 24 \cdot 12}{4 \cdot 6 + 6 \cdot 12 + 12 \cdot 4} = 0;$$

$$I_3 = \frac{E_1 r_2 + E_2 r_1}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} = \frac{24 \cdot 6 + 18 \cdot 4}{4 \cdot 6 + 6 \cdot 12 + 12 \cdot 4} = 1,43 \text{ а}.$$

На основании полученных значений токов можно сделать следующий вывод. Первый источник электрической энергии работает в режиме генератора, посылая ток потребителю с сопротивлением $r_3 = 12$ ом. Второй источник находится в режиме холостого хода, т. е. его ток $I_2 = 0$. Это значит, что он, невзирая на то, что подключен к цепи, не отдает своей энергии потребителю и не получает ее от другого источника.

Для третьего варианта задачи $E_1 = 24$ в, $E_2 = 18$ в, $r_1 = 4$ ом, $r_2 = 6$ ом и $r_3 = 16$ ом.

Применив формулы (IV), (V) и (VI), получим:

$$I_1 = \frac{E_1 (r_2 + r_3) - E_2 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} = \frac{24(6 + 16) - 18 \cdot 16}{4 \cdot 6 + 6 \cdot 16 + 16 \cdot 4} = 1,3 \text{ а};$$

$$I_2 = \frac{E_2(r_1 + r_3) - E_1 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} = \frac{18(4 + 16) - 24 \cdot 16}{4 \cdot 6 + 6 \cdot 16 + 16 \cdot 4} = -0,13 \text{ а};$$

$$I_3 = \frac{E_1 r_2 + E_2 r_1}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1} = \frac{24 \cdot 6 + 18 \cdot 4}{4 \cdot 6 + 6 \cdot 16 + 16 \cdot 4} = 1,17 \text{ а}.$$

На основании полученных решений для токов I_1 , I_2 и I_3 можно сделать следующий вывод. Первый источник электрической энергии работает в режиме генератора, посылая ток во второй источник и в потребитель с сопротивлением r_3 . Второй источник имеет ток отрицательный ($I_2 = -0,13$ а). Это значит, что ток поступает в него со стороны его положительного полюса и этот источник работает в режиме потребителя — аккумулятор заряжается со стороны первого источника. В этом случае

$$I_1 + I_2 = I_3,$$

или, иначе,

$$1,3 + (-0,13) = 1,17 = I_3.$$

Примечание. При решении задач по расчету сложных цепей постоянного тока методом применения законов Кирхгофа не обязательно решать задачи в общем виде до конца. Последнее необходимо в том случае,

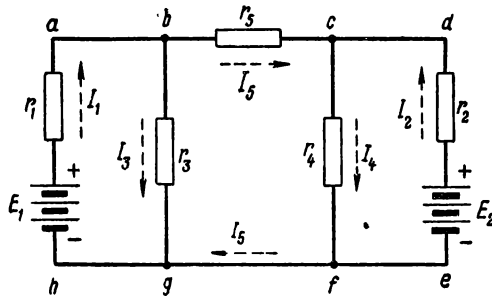


Рис. 89. Схема сложной цепи

когда из полученного решения мы желаем сделать какие-нибудь общие выводы. Например, из формулы (IV) мы можем сделать следующие полезные выводы. Если соотношение параметров цепи таково, что $E_1(r_2 + r_3) > E_2 r_3$, то ток $I_1 > 0$. Следовательно, источник электрической энергии с электродвижущей силой E_1 в этом случае работает в режиме генератора. Если же $E_1(r_2 + r_3) < E_2 r_3$, то ток $I_1 < 0$. Это значит, что источник работает в режиме потребителя. И, наконец, если $E_1(r_2 + r_3) = E_2 r_3$, то ток $I_1 = 0$, т. е. источник находится в режиме холостого хода.

Аналогичный анализ можно провести на основании формулы (V), дающей возможность определить ток I_2 второго источника электрической энергии.

Если мы не задаемся целью получить решение задачи в общем виде, то бывает полезно сразу же подставлять в исходные уравнения Кирхгофа вместо букв численные значения и этим несколько облегчить решение уравнений.

Пример 60. Задана сложная цепь (рис. 89), в которой один источник электрической энергии имеет электродвижущую силу $E_1 = 120$ в, а другой $E_2 = 110$ в. Сопротивления в цепи равны: $r_1 = 1$ ом, $r_2 = 1$ ом, $r_3 = 10$ ом, $r_4 = 2$ ом и $r_5 = 2$ ом. Требуется определить величины и направления токов во всех участках заданной цепи.

Решение. В данной задаче имеется пять неизвестных токов: I_1, I_2, I_3, I_4 и I_5 , положительные направления которых отмечены на схеме (рис. 89) пунктирными стрелками.

Для определения этих токов необходимо составить пять независимых уравнений согласно первому и второму законам Кирхгофа. Для составления уравнений по первому закону Кирхгофа используем узловые точки b и c схемы, а для составления остальных трех уравнений используем контуры $abgha, cdefc$ и $bcfgb$.

Для узловой точки b

$$I_1 = I_3 + I_5. \quad (\text{I})$$

Для узловой точки c

$$I_4 = I_2 + I_5. \quad (\text{II})$$

Для контура $abgha$

$$E_1 = I_1 r_1 + I_3 r_3,$$

или

$$120 = I_1 + 10I_3. \quad (\text{III})$$

Для контура $cdefc$

$$E_2 = I_2 r_2 + I_4 r_4,$$

или

$$110 = I_2 + 2I_4. \quad (\text{IV})$$

Для контура $bcfgb$

$$I_5 r_5 + I_4 r_4 = I_3 r_3,$$

или

$$2I_5 + 2I_4 = 10I_3;$$

после сокращения на два получаем

$$I_5 + I_4 = 5I_3. \quad (\text{V})$$

Подставим в уравнение (III) вместо I_1 его выражение из уравнения (I):

$$120 = I_3 + I_5 + 10I_3,$$

или

$$I_5 + 11I_3 = 120. \quad (\text{III}')$$

Подставим в уравнения (IV) и (V) вместо I_4 его выражение из уравнения (II):

$$110 = I_2 + 2I_2 + 2I_5,$$

или

$$3I_2 + 2I_5 = 110, \quad (\text{IV}')$$

и

$$2I_5 + 2I_2 + 2I_5 = 10I_3,$$

или

$$2I_2 + 4I_5 = 10I_3,$$

или же

$$I_2 + 2I_5 = 5I_3. \quad (V')$$

Из уравнения (V') получаем

$$I_2 = 5I_3 - 2I_5. \quad (V'')$$

Подставляем в уравнение (IV') вместо I_2 его выражение из уравнения (V''):

$$3(5I_3 - 2I_5) + 2I_5 = 110,$$

или

$$15I_3 - 6I_5 + 2I_5 = 110,$$

или, иначе,

$$15I_3 - 4I_5 = 110. \quad (IV''')$$

Решим совместно уравнения (III') и (IV'''). Для этого помножим уравнение (III') на 4 и сложим его с уравнением (IV'''):

$$\begin{array}{r} 4I_5 + 44I_3 = 480 \\ + \quad -4I_5 + 15I_3 = 110 \\ \hline 59I_3 = 590 \end{array},$$

или

$$I_3 = \frac{590}{59} = 10 \text{ а.}$$

Из уравнения (IV''') находим I_5 :

$$I_5 = \frac{15I_3 - 110}{4} = \frac{15 \cdot 10 - 110}{4} = 10 \text{ а.}$$

Из уравнения (I) определяем ток I_1 :

$$I_1 = I_3 + I_5 = 10 + 10 = 20 \text{ а.}$$

Из уравнения (V'') находим ток I_2 :

$$I_2 = 5I_3 - 2I_5 = 5 \cdot 10 - 2 \cdot 10 = 30 \text{ а.}$$

Из уравнения (II) находим ток I_4 :

$$I_4 = I_2 + I_5 = 30 + 10 = 40 \text{ а.}$$

Все токи получились положительными, а поэтому они текут в цепи в направлении пунктирных стрелок, показывающих положительное направление тока.

Правильность решения задачи можно проверить путем подстановки значений полученных токов в исходные уравнения, например в уравнение (III):

$$120 = I_1 + 10I_3; \quad 120 = 20 + 10 \cdot 10 = 120$$

или в уравнение (V):

$$I_5 + I_4 = 5I_3; \quad 10 + 40 = 5 \cdot 10 = 50.$$

Следовательно, задача решена правильно.

§ 61. МЕТОД КОНТУРНЫХ ТОКОВ

При применении законов Кирхгофа к расчету сложных цепей постоянного тока каждый раз приходится составлять столько уравнений, сколько неизвестных. Если этих неизвестных относительно много, что весьма часто бывает в практике, то применение метода уравнений Кирхгофа становится затруднительным

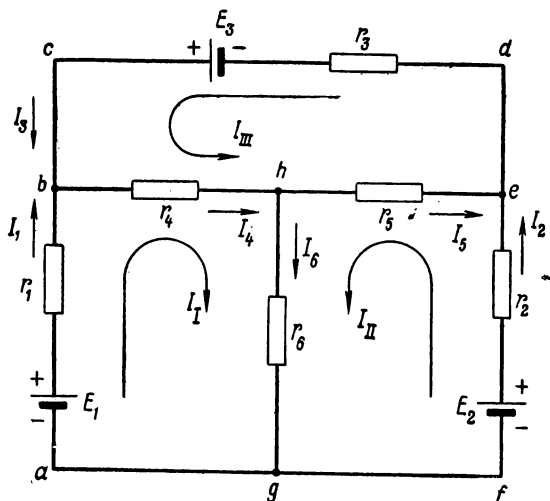


Рис. 90. Схема сложной цепи

из-за необходимости решать систему с большим числом уравнений. В этих случаях обычно используют иные методы, в частности метод контурных токов, дающий возможность значительно сократить число уравнений для определения искомого тока. Конкретно, этот метод дает возможность избавиться от необходимости составления уравнений по первому закону Кирхгофа и ограничиться решением системы уравнений, составленной только по второму закону Кирхгофа.

Допустим, что задана сложная цепь (рис. 90), в которой известны все электродвижущие силы и сопротивления и требуется определить величины токов во всех участках этой цепи.

Если бы мы эту задачу стали решать, применяя метод уравнений Кирхгофа, то нам понадобилось бы составить систему из шести уравнений с шестью неизвестными токами (I_1, I_2, \dots, I_6). Так как в заданной схеме имеются четыре узловых точки, то мы составили бы три уравнения по первому закону Кирхгофа, а остальные три уравнения — по второму закону. Метод контурных токов дает возможность решить эту задачу, составив систему из трех уравнений по второму закону Кирхгофа.

Допустим, что в контурах $abhga$, $ehgfe$ и $cbhedc$ протекают некоторые условные контурные токи. Например, во всех участках контура $abhga$ проходит контурный ток I_I , во всех участках контура $ehgfe$ — ток I_{II} и во всех участках контура $cbhedc$ — ток I_{III} .

Контурные токи являются величинами алгебраическими, а поэтому их положительные направления, условно задаваемые нами, обычно отмечаются кривыми стрелками в контурах (рис. 90). В нашем случае положительное направление контурного тока I_I совпадает с направлением вращения часовой стрелки, а контурный ток I_{II} направлен против часовой стрелки, так же как и контурный ток I_{III} .

Если будут определены контурные токи во всех контурах заданной сложной цепи, то уже не представит затруднений вычислить реальные токи во всех участках этой цепи.

В тех участках цепи, где одновременно имеется несколько контурных токов, реальный ток в них равен алгебраической сумме контурных токов. Например, в участке цепи с сопротивлением r_6 (рис. 90) имеются два контурных тока I_I и I_{II} , причем их положительные направления совпадают. Следовательно, реальный ток I_6 , протекающий по сопротивлению r_6 , равен алгебраической сумме контурных токов I_I и I_{II} .

$$I_6 = I_I + I_{II}$$

Наоборот, в сопротивлении r_5 контурные токи I_{II} и I_{III} имеют направления противоположные. Следовательно, реальный ток, протекающий по сопротивлению r_5 , будет равен

$$I_5 = I_{II} - I_{III}$$

Если в результате решения задачи ток I_5 окажется положительной величиной, то он имеет направление, совпадающее с положительным направлением контурного тока I_{II} , а если он получится отрицательным, то он имеет направление, совпадающее с положительным направлением контурного тока I_{III} .

Если в данном участке цепи имеется только один контурный ток, то реальный ток в этом участке цепи равен по величине данному контурному току и совпадает с ним по направлению.

Для определения контурных токов I_I , I_{II} и I_{III} составим три уравнения, аналогичные уравнениям второго закона Кирхгофа. Однако в отличие от последних в этих уравнениях падения напряжения на участках цепи будут приниматься равными алгебраической сумме падений напряжений от каждого из контурных токов. Например, в сопротивлении r_4 (рис. 90) падение напряжения будет равно

$$U_4 = I_I r_4 + I_{III} r_4,$$

падение напряжения в сопротивлении r_5 будет равно

$$U_5 = I_{II} r_5 - I_{III} r_5$$

и т. д.

Если мы будем обходить контур $abgha$ в направлении, совпадающем с положительным направлением контурного тока I_I , то уравнение второго закона Кирхгофа в соответствии с вышеизложенным запишем в следующем виде:

$$E_1 = I_I r_1 + I_I r_4 + I_I r_6 + I_{III} r_4 + I_{II} r_6,$$

или

$$E_1 = I_I (r_1 + r_4 + r_6) + I_{II} r_6 + I_{III} r_4. \quad (I)$$

Обходя контур $ehgfe$ в направлении, совпадающем с положительным направлением контурного тока I_{II} , запишем уравнение второго закона Кирхгофа в следующем виде:

$$E_2 = I_{II} r_2 + I_{II} r_5 + I_{II} r_6 + I_I r_6 - I_{III} r_5,$$

или

$$E_2 = I_I r_6 + I_{II} (r_2 + r_5 + r_6) - I_{III} r_5. \quad (II)$$

И, наконец, обходя контур $cbhedc$ в направлении, совпадающем с положительным направлением контурного тока I_{III} , запишем уравнение второго закона Кирхгофа в следующем виде:

$$E_3 = I_{III} r_3 + I_{III} r_4 + I_{III} r_5 + I_I r_4 - I_{II} r_5,$$

или

$$E_3 = I_I r_4 - I_{II} r_5 + I_{III} (r_3 + r_4 + r_5). \quad (III)$$

Систему уравнений (I), (II) и (III) решаем относительно неизвестных контурных токов приемами, применяемыми в элементарной алгебре.

Найдя величины контурных токов I_I , I_{II} и I_{III} , определим реальные токи I_1 , I_2 , I_3 , I_4 и I_5 , исходя из следующих соотношений:

$$I_1 = I_I; \quad I_2 = I_{II}; \quad I_3 = I_{III};$$

$$I_4 = I_I + I_{III}; \quad I_5 = I_{II} - I_{III} \text{ и } I_6 = I_I + I_{II}.$$

Определив величины и направления реальных токов, обозначим прямыми короткими стрелками их направления на всех участках заданной сложной цепи.

Правильность решения задачи можно проверить, написав обычное уравнение второго закона Кирхгофа с учетом реальных токов для какого-либо контура. Например, для контура $abhga$ оно принимает следующий вид:

$$E_1 = I_1 r_1 + I_4 r_4 + I_6 r_6.$$

Если в результате подстановки в это уравнение численных значений сопротивлений r_1 , r_4 , r_6 , токов I_1 , I_4 и I_6 и электродвижущей силы E_1 получим тождество, то задача решена правильно.

Пример 61. Определить токи во всех участках сложной цепи (рис. 90), если известно, что $E_1 = 130$ в, $E_2 = 40$ в, $E_3 = 100$ в, $r_1 = 1$ ом, $r_2 = 5$ ом, $r_3 = 2$ ом, $r_4 = 4$ ом, $r_5 = 10$ ом и $r_6 = 5$ ом.

Решение. Задаемся положительными направлениями контурных токов I_I , I_{II} и I_{III} так, как это показано изогнутыми стрелками на схеме (рис. 90).

Для контура $abhga$

$$E_1 = I_I(r_1 + r_4 + r_6) + I_{II}r_6 + I_{III}r_4,$$

или

$$130 = 10I_I + 5I_{II} + 4I_{III}. \quad (I)$$

Для контура $ehgfe$

$$E_2 = I_I r_6 + I_{II}(r_2 + r_5 + r_6) - I_{III}r_5,$$

или

$$40 = 5I_I + 20I_{II} - 10I_{III},$$

сокращая на 5, получим:

$$8 = I_I + 4I_{II} - 2I_{III}. \quad (II)$$

Для контура $cbhedc$

$$E_3 = I_I r_4 - I_{II} r_5 + I_{III}(r_3 + r_4 + r_5),$$

или

$$100 = 4I_{\text{I}} - 10I_{\text{II}} + 16I_{\text{III}}$$

или же

$$2I_{\text{I}} - 5I_{\text{II}} + 8I_{\text{III}} = 50. \quad (\text{III})$$

Из уравнения (II) находим

$$I_{\text{I}} = 8 - 4I_{\text{II}} + 2I_{\text{III}}. \quad (\text{II}')$$

Подставляем полученное выражение для I_{I} в уравнение (I):

$$10(8 - 4I_{\text{II}} + 2I_{\text{III}}) + 5I_{\text{II}} + 4I_{\text{III}} = 130,$$

или

$$80 - 40I_{\text{II}} + 20I_{\text{III}} + 5I_{\text{II}} + 4I_{\text{III}} = 130,$$

или, иначе,

$$-35I_{\text{II}} + 24I_{\text{III}} = 50. \quad (\text{I}')$$

Подставляем выражение для I_{I} в уравнение (III):

$$2(8 - 4I_{\text{II}} + 2I_{\text{III}}) - 5I_{\text{II}} + 8I_{\text{III}} = 50,$$

или

$$16 - 8I_{\text{II}} + 4I_{\text{III}} - 5I_{\text{II}} + 8I_{\text{III}} = 50,$$

или, иначе,

$$-13I_{\text{II}} + 12I_{\text{III}} = 34. \quad (\text{III}')$$

Умножим левую и правую части уравнения (III') на 2 и вычтем из него уравнение (I'):

$$\begin{array}{r} -26I_{\text{II}} + 24I_{\text{III}} = 68 \\ - \quad -35I_{\text{II}} + 24I_{\text{III}} = 50 \\ \hline 9I_{\text{II}} \qquad \qquad = 18 \end{array}$$

Отсюда находим, что

$$I_{\text{II}} = \frac{18}{9} = 2 \text{ а.}$$

Из уравнения (III') находим:

$$I_{\text{III}} = \frac{34 + 13I_{\text{II}}}{12} = \frac{34 + 13 \cdot 2}{12} = 5 \text{ а.}$$

Из уравнения (II') получаем.

$$I_{\text{I}} = 8 - 4I_{\text{II}} + 2I_{\text{III}} = 8 - 4 \cdot 2 + 2 \cdot 5 = 10 \text{ а.}$$

Определив контурные токи, найдем реальные токи в заданной цепи:

$$I_1 = I_I = 10 \text{ а}; \quad I_4 = I_I + I_{III} = 10 + 5 = 15 \text{ а};$$

$$I_2 = I_{II} = 2 \text{ а}; \quad I_5 = I_{III} - I_{II} = 5 - 2 = 3 \text{ а};$$

$$I_3 = I_{III} = 5 \text{ а}; \quad I_6 = I_I + I_{II} = 10 + 2 = 12 \text{ а}.$$

Направление тока I_5 совпадает с положительным направлением контурного тока I_{III} .

Проверка правильности решения:

Для контура $abhga$

$$E_1 = I_1 r_1 + I_4 r_4 + I_6 r_6,$$

или

$$130 = 10 \cdot 1 + 15 \cdot 4 + 12 \cdot 5 = 130,$$

т. е. решение, полученное нами, правильно.

—————

ГЛАВА XIII

ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

§ 62. ТЕРМИЧЕСКИЙ ЭКВИВАЛЕНТ

Электрический ток всегда сопровождается выделением тепла в проводнике, по которому он протекает.

Чем больше ток в проводнике, тем быстрее движутся электрические заряды в нем, тем чаще они «сталкиваются» с атомами, встречающимися на пути их движения. В результате этих «столкновений» заряды отдают часть своей электрической энергии атомам, заставляя их более интенсивно колебаться. А это значит, что электрическая энергия, отдаваемая зарядами атомам, превращается в тепловую энергию.

Получение тепла за счет электрической энергии является конечной целью работы некоторых потребителей электрической энергии, например электрических нагревательных приборов. Но в большинстве случаев неизбежное превращение части электрической энергии в теплоту представляет собой непроизводительный расход энергии, снижающий к. п. д. установки (например, выделение тепла в соединительных проводах, в обмотках машины и т. д.).

Для того чтобы подсчитать, какое количество тепла выделяет ток в проводнике, надо установить эквивалентное соотношение между электрической и тепловой энергией:

$$1 \text{ джоуль} = \frac{1}{9,81} \text{ кгм.}$$

Но, как известно, 1 кгм эквивалентен $\frac{1}{427}$ большой калории тепла, или $\frac{1000}{427}$ малым калориям тепла. Следовательно, 1 джоуль эквивалентен $\frac{1000}{9,81 \cdot 427} = 0,24$ малой калории тепла:

$$1 \text{ дж} \approx 0,24 \text{ м. кал.}$$

Величину

$$C = 0,24 \frac{\text{малая калория}}{\text{джоуль}} \quad (93)$$

называют **термическим эквивалентом**.

§ 63. ЗАКОН ЛЕНЦА — ДЖОУЛЯ

Изучая тепловое действие тока, русский ученый Э. Х. Ленц открыл закон, устанавливающий зависимость между количеством тепла, выделяемого током, и величиной этого тока. Этот закон вошел в электротехнику под названием закона Ленца — Джоуля, так как одновременно с Ленцем он был открыт и английским физиком Джоулем. Э. Х. Ленц известен своими фундаментальными трудами в области теоретической электротехники. Кроме вышеуказанного закона, он сформулировал так называемое «правило Ленца», с которым мы подробно ознакомимся впоследствии, а также обосновал принцип обратимости электрических машин и ряд других теоретических положений из области электромагнетизма. Научная работа Э. Х. Ленца протекала на заре развития электротехники, и его открытия в области теоретической электротехники исключительно важны.

Рассмотрим, в чем же заключается сущность закона Ленца — Джоуля и каково его практическое значение.

Как известно, работа электрического тока может быть подсчитана по формуле

$$A = I^2 R t,$$

где A — работа электрического тока в джоулях;

I — ток в амперах;

R — сопротивление в омах;

t — время в секундах.

Один джоуль эквивалентен 0,24 *м. кал.* Следовательно, для того чтобы подсчитать, какое количество тепла выделится в проводнике за счет электрической энергии, надо число затраченных джоулей помножить на термический эквивалент:

$$C = 0,24 \frac{\text{малая калория}}{\text{джоуль}}.$$

В соответствии с этим

$$Q = CA = 0,24 I^2 R t, \quad (94)$$

где Q — количество тепла в малых калориях.

Формула (94) является математическим выражением **закона Ленца — Джоуля**, который можно сформулировать следующим образом: **количество тепла, выделяемого током в проводнике при**

неизменном сопротивлении R последнего, прямо пропорционально квадрату величины тока и времени, в течение которого этот ток протекал по проводнику.

Пример 62. Определить, какое количество тепла выделилось в проводнике, обладающем сопротивлением $R = 25 \text{ ом}$, в течение $t = 15$ минут, если ток в нем был равен $I = 5 \text{ а}$.

Решение. По формуле (94) находим

$$Q = 0,24I^2Rt = 0,24 \cdot 5^2 \cdot 25 \cdot 15 \cdot 60 = 135\,000 \text{ м. кал.}$$

§ 64. ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

При значительной перегрузке электрических приборов токами или при коротком замыкании их выделяется такое большое количество тепловой энергии, что возникает угроза сохранности установки и даже опасность пожара.

Для предохранения проводов и аппаратов от чрезмерно больших токов применяют ряд предохранительных приспособлений,

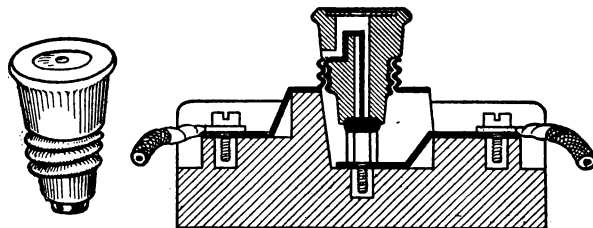


Рис. 91. Пробочный плавкий предохранитель

из которых наибольшей простотой конструкции отличаются плавкие предохранители.

Принцип действия плавкого предохранителя заключается в следующем.

Последовательно с потребителем электрической энергии включается легкоплавкая проволока, которая при определенном токе перегорает и, разрывая цепь, отключает потребитель от генератора электрической энергии.

Обычно на каждом плавком предохранителе указывается номинальный ток $I_{\text{ном}}$, т. е. предельный допустимый рабочий ток, который продолжительное время может протекать через плавкую вставку предохранителя. Если ток превышает номинальный на $150 \div 200\%$, то плавкая вставка должна расплавиться.

Согласно стандартным нормам плавкие вставки предохранителей изготовляются на номинальные токи: 4, 6, 10, 15, 20, 25 а и т. д.

Запрещается использовать вместо плавких предохранителей суррогаты, например металлическую проволоку и т. п., так как

при таком «предохранителе» может возникнуть аварийный режим в цепи и вспыхнуть пожар.

Предохранители, используемые в электротехнике, бывают различных конструкций. Рассмотрим некоторые из наиболее употребительных типов плавких предохранителей.

1. На рис. 91 показан широко применяемый тип пробочного предохранителя. Пробка ввинчивается в соответствующий патрон и этим замыкает цепь через легкоплавкую нить, смонтированную внутри пробки. На каждой пробке указана та максимальная величина тока, на которую она рассчитана.

2. На рис. 92 показан широко применяемый в технике связи трубчатый предохранитель, рассчитанный на относительно малые токи. Патрон в предохранителе состоит из стеклянного баллона 1, в который помещена тонкая проволока 2 из легкоплавкого материала, припаянная концами к металлическим колпачкам 3, посаженным по концам трубочки. При прохождении тока свыше, например, 0,25 а проволока в патроне перегорает. Патрон предохранителя вставляется в пружинные стойки, смонтированные на цоколе из изолирующего материала.

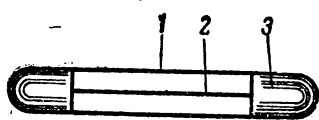


Рис. 92. Трубчатый плавкий предохранитель:

1 — стеклянный баллон; 2 — проволока из легкоплавкого материала; 3 — металлические колпачки

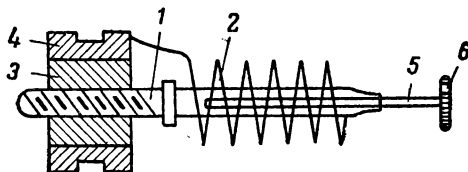


Рис. 93. Схема термической катушки:

1 — стержень; 2 — катушка; 3 — втулка; 4 — основание; 5 — штифт; 6 — головка штифта

Предохранитель устанавливается на каждый линейный провод связи при вводе последнего в помещение телеграфной станции.

3. В телефонных установках для предохранения аппаратуры от случайного попадания больших токов в линию применяются термические катушки (рис. 93). На латунный стержень 1 надета катушка 2, которая одним концом прикреплена к основанию 4 катушки, а другим — к стержню. Стержень 1 одним концом заделан в эбонитовую втулку 3. Металлический штифт 5, имеющий на одном конце головку 6, другим концом закреплен в стержне 1 легкоплавким материалом. Если в цепи будут токи более 0,5 а, то легкоплавкий состав под действием тепла, выделяющегося в катушке 2, расплавится и штифт 5 при помощи пружины, действующей на головку 6 штифта, будет извлечен из стержня 1 и разорвет цепь.

§ 65. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЛАМПЫ

Электрический ток, проходя по металлическим проводникам, выделяет в них тепло, повышая их температуру. Если нагреть проводник до белого каления, то он начнет испускать ослепительно яркий поток световой энергии. На этом основана работа электрических ламп, применяемых для освещения.

Приоритет изобретения электрической лампы накаливания принадлежит известному русскому изобретателю **А. Н. Лодыгину**. Первая лампа Лодыгина послужила прообразом всех современных электрических ламп.

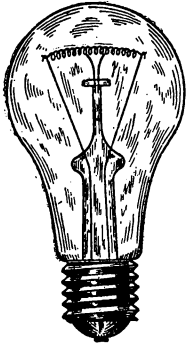


Рис. 94. Газонаполненная электрическая лампа

На рис. 94 показана газонаполненная электрическая лампа. Она состоит из стеклянного баллона, в котором воздух заменен инертным газом (например, азотом или аргоном), не поддерживающим горение. В баллоне лампы помещена металлическая нить, изготовленная из тугоплавких материалов, например вольфрама, осмия, тантала или их сплавов. Через цоколь лампы наружу выведены концы ламповой нити, из которых один припаян к пяточке цоколя, а другой — к его винтовой нарезке.

При прохождении электрического тока через нить лампы она накаливается и излучает световой поток. Чем больше величина тока в нити лампы, тем сильнее она накаливается и тем ярче светит. В современных газонаполненных лампах температуру вольфрамовой нити доводят примерно до 3000°C (температура плавления вольфрама 3370°C).

Коэффициент полезного действия газонаполненных ламп не превышает 5%, так как значительная часть электрической энергии в них превращается в тепло. Электрическая лампа является самым несовершенным с точки зрения к. п. д. прибором в ряду других потребителей электрической энергии.

Наполнение баллона лампы инертным газом преследует цель создать в баллоне давление на нить и тем самым предотвратить сильное распыление нити лампы, приводящее к ее перегоранию.

В настоящее время широкое распространение получили «лампы дневного света». Это стеклянные трубки, внутренняя поверхность которых покрыта особым светосоставом. Трубка наполнена газом, например парами ртути, под небольшим давлением. Газ при прохождении через него ионного электрического тока излучает ультрафиолетовый свет. Ультрафиолетовые лучи, попадая на светосостав, нанесенный на внутреннюю поверхность трубки, заставляют его светиться. При этом свет, излучаемый лампой, мало чем отличается от обычного дневного естественного света. «Лампы дневного света» весьма экономичны в эксплуатации в силу малых тепловых потерь энергии. Они дают

приятный для глаза свет, не утомляющий зрения. Следует отметить, что в деле создания «ламп дневного света» плодотворную работу проделали советские ученые и инженеры под руководством академика С. И. Вавилова (1891—1951), автора ряда научных трудов в области световых явлений.

§ 66. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА

Если два угольных стержня (рис. 95) подключить к зажимам генератора постоянного тока и затем довести их до соприкосновения друг с другом, то в образовавшейся замкнутой цепи возникнет постоянный ток. Вследствие относительно большого переходного сопротивления контакта угольных электродов в нем выделяется значительное количество

тепла, которое при соответствующей величине тока нагревает концы угольных электродов до белого каления. Если начать постепенно раздвигать угольные электроды, то электрический ток в цепи не прекратится и тогда, когда между ними образуется некоторый зазор. Под влиянием слишком высокой температуры концов угольных электродов между ними образуется раскаленный газ, обладающий ионной проводимостью, так что фактически цепь электрического тока остается замкнутой.

Раскаленный, ярко светящийся газ между угольными электродами перекинут с одного электрода на другой в виде мостика, напоминающего дугу.

Явление прохождения электрического тока в промежутке между двумя электродами, сопровождаемое очень высокой температурой концов электродов и излучением мощного светового потока, называется **электрической дугой**.

Явление электрической дуги было открыто в 1803 г. русским ученым В. В. Петровым.

Физические процессы, наблюдающиеся в электрической дуге, в основном сводятся к следующему.

С раскаленного добела катода, т. е. электрода, соединенного с отрицательным полюсом источника электрической энергии, выделяется мощный поток свободных электронов, которые под влиянием сил электрического поля мчатся с большими скоростями по направлению к аноду — угольному электроду, соединенному с положительным зажимом источника электрической энергии. Эти электроны, пролетая через раскаленный газ, стал-

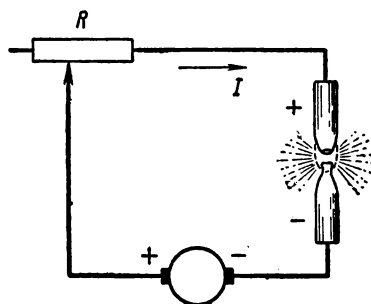


Рис. 95. Схема включения электрической дуги в электрическую цепь

квиваются на пути своего движения с молекулами газа и выбивают из них электроны, т. е. ионизируют их. Электроны, достигшие анода, бомбардируют его, отдавая ему свою кинетическую энергию (энергию движения), и этим способствуют возникновению на аноде очень высокой температуры. Появившиеся в раскаленном газе положительные ионы под влиянием сил поля

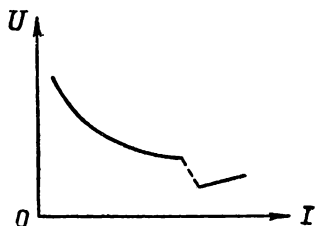


Рис. 96. Вольтамперная характеристика электрической дуги

мчатся по направлению к катоду и, отдавая ему свою кинетическую энергию, поддерживают его высокую температуру. Температура катода в электрической дуге с угольными электродами в среднем достигает 3000°C , а температура анода — 4000°C . При такой высокой температуре уголь испаряется и на конце анода возникает нечто вроде кратера (впадины), излучающего ослепительно яркий поток световых лучей. Электрическая дуга может существовать

только в том случае, если катод имеет температуру белого каления, так как только при этом условии он может излучать поток электронов. Раскаленные частицы угля, испаряющиеся с поверхности анода, переносятся на катод и частично осаждаются на нем. В результате катод принимает несколько заостренную форму. По этим характерным очертаниям концов электродов легко отличить анод от катода (см. рис. 95).

С ростом тока, питающего электрическую дугу, усиливается ионизация, увеличивающая проводимость дуги. Поэтому падение напряжения на электрической дуге уменьшается с ростом тока. Следовательно, в электрической дуге закон Ома теряет свою силу, так как нет прямой пропорциональной зависимости между напряжением U на дуге и величиной тока I .

На рис. 96 показан график зависимости между током I и напряжением U в электрической дуге, называемый характеристикой дуги. Из графика мы видим, что с ростом тока I напряжение U падает и при некоторой величине тока резко, скачком, уменьшается до определенной величины, а затем уже мало изменяется с ростом тока. При нормальных значениях тока (левая часть характеристики дуги) дуга горит нормально, устойчиво. Но при больших значениях тока, в особенности после скачкообразного падения напряжения, дуга горит неустойчиво, анод обгорает неровно, горение сопровождается шипением. В этом режиме электрическую дугу использовать нельзя.

Чрезвычайно высокая температура анода электрической дуги сопровождается мощным излучением светового потока, который используется для освещения. Электрическая дуга успешно применяется в прожекторах, а также для электросварки металлических деталей и проводов.

Работая над усовершенствованием приборов для регулирования электрической дуги, русский ученый П. Н. Яблочков изобрел в 1876 г. осветительный прибор, который в электротехнику вошел под названием **свечи Яблочкова**. Эта свеча состояла из двух вертикально и параллельно расположенных ретортных углей, отделенных друг от друга слоем изолирующего вещества. Электрическая дуга зажигалась между концами палочек ретортного угля, и по мере сгорания их изолирующая прослойка между ними испарялась. Свеча Яблочкова в свое время сыграла исключительную роль как первое практическое применение электрического освещения в широком масштабе.

ГЛАВА XIV

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 67. ПОНЯТИЕ О МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Всякая система электрических токов обладает магнитным полем.

Магнитное поле представляет собой особый вид материи, через который осуществляется физический процесс взаимодействия электрических токов — взаимное притяжение проводов с токами одного направления и отталкивание проводов с токами разного направления.

Всякое изменение взаимного расположения проводов с токами в пространстве, а также изменение величины этих токов во времени связано с изменением их общего магнитного поля.

Изменяемость магнитного поля в пространстве и во времени представляет собой своеобразную форму материального движения в природе, при котором наблюдается переход магнитного поля в электрическое и соответственно этому преобразование энергии магнитного поля в энергию электрического поля.

Если взаимодействие проводников с электрическими токами осуществляется через их общее магнитное поле, значит, это поле действует непосредственно на проводники с токами.

Всякое магнитное поле, как некоторый вид материи, обладает энергией. Величина энергии магнитного поля зависит от величины электрических токов, создающих это поле, от их конфигурации и от физических свойств той среды, где это поле существует.

Если величина тока, создающего данное магнитное поле, растет, то вместе с этим растет энергия и масса его магнитного поля. Приращение энергии магнитного поля в данном случае осуществляется за счет работы источника электрической энергии, создающего ток. Наоборот, если величина тока уменьшается, то магнитное поле также становится более слабым. Его энергия в этом случае исчезает, преобразуясь в другие виды энергии, например энергию электрического поля или энергию тепловую.

О наличии магнитного поля в данной области пространства

можно судить по тем механическим силам, с которыми данное поле действует на проводники с токами, магнитные стрелки и т. д., помещенные в этом поле.

Действие сил в магнитном поле можно обнаружить различными способами. Например, если под прямолинейный проводник

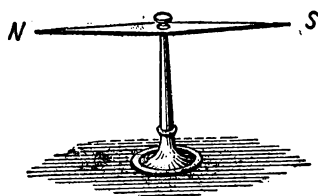


Рис. 97. Магнитная стрелка

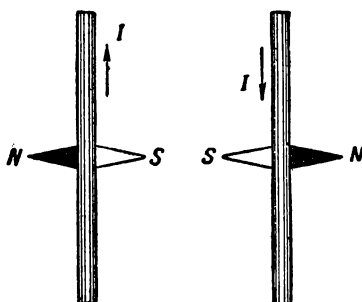


Рис. 98. Магнитная стрелка устанавливается перпендикулярно к направлению тока

с током поместить магнитную стрелку (рис. 97), могущую вращаться вокруг вертикальной оси, то она под влиянием сил магнитного поля будет устанавливаться перпендикулярно направлению тока (рис. 98).

Если направление тока в проводе изменится, то магнитная стрелка под влиянием сил магнитного поля повернется на угол 180° вокруг своей вертикальной оси (см. рис. 98). Значит, направление сил магнитного поля зависит от направления электрического тока в проводе.

Если вертикально расположенный прямолинейный проводник с током пропустить через плоский картон и на последний насыпать мелких железных опилок, то, постукивая слегка по картону, можно заставить железные опилки расположиться по замкнутым кривым линиям вокруг проводника с током (рис. 99). Это значит, что магнитные силы действуют на железо и что направление их действия совпадает с направлениями кривых линий, охватывающих проводник с током. Эти линии являются концентрическими окружностями с центрами на оси проводника.

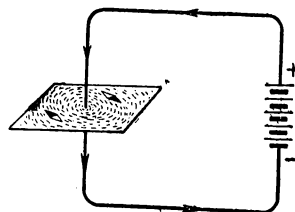


Рис. 99. Железные опилки вокруг прямолинейного провода с током располагаются по замкнутым кривым линиям

Если поместить на картоне маленькие магнитные стрелочки на вертикальных осях, то они расположатся вокруг проводника с током по замкнутым концентрическим окружностям.

Известно, что магнитная стрелка, например стрелка компаса, в нормальных условиях устранивается в направлении с юга на север, т. е. примерно в направлении географического меридиана. Тот конец магнитной стрелки, который поворачивается на север, является северным магнитным полюсом, а противоположный ему конец — южным магнитным полюсом.

Опыт показал, что в пространстве, окружающем земной шар, существует магнитное поле, в котором направление действия магнитных сил примерно совпадает с направлением географического меридиана. Это магнитное поле называется полем земного магнетизма, и создается оно электрическими токами. Земной шар окружен атмосферой, заряженной электричеством (положительными и отрицательными ионами). Эти атмосферные заряды, вращаясь вместе с земным шаром вокруг его оси, создают круговые токи, сопровождаемые магнитным полем. Кроме того, в недрах земли есть большое количество магнитной железной руды, которая также создает магнитное поле земного магнетизма. Но, как это мы увидим впоследствии, магнитная руда создает свое магнитное поле также за счет круговых токов, имеющихся в ее элементарных частицах.

Пользуясь магнитной стрелкой, можно установить направление действия магнитных сил, или, иначе говоря, направление магнитного поля. Условно принято считать, что направление магнитной силы в данной точке поля совпадает с тем направлением, которое показывает северный полюс магнитной стрелки, ориентированной в данной точке поля. На основании этого можно сказать, что магнитное поле земного магнетизма на поверхности земли направлено с юга на север и что магнитная стрелка своим южным полюсом всегда обращена навстречу силам поля.

Для графического изображения электрического поля мы пользовались электрическими силовыми линиями. Аналогично этому для графического изображения магнитного поля используют магнитные силовые линии.

Магнитной силовой линией называют такую геометрическую линию, в любой точке которой магнитная сила является касательной к ней и направлена в ту сторону, куда показывает своим северным полюсом ориентированная в этом поле магнитная стрелка (рис. 100). Согласно этому определению магнитные силовые линии в поле земного магнетизма направлены с юга на север.



Рис. 100. Северный полюс магнитной стрелки показывает направление магнитного поля

В общем случае на практике приходится иметь дело с такими магнитными полями, в которых магнитные линии имеют самую разнообразную конфигурацию и

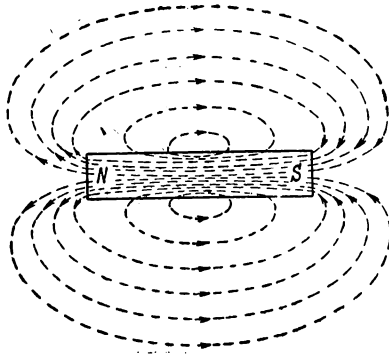


Рис. 101. Магнитное поле стержневого магнита

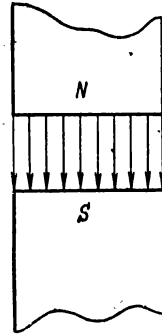


Рис. 102. Однородное магнитное поле

располагаются в различных областях поля с различной плотностью. Магнитные поля подобного рода называются *неоднородными*. Примером неоднородного магнитного поля может служить поле стержневого магнита, изображенное на рис. 101.

В противоположность неоднородному магнитному полю в *однородном* магнитном поле магнитные линии прямолинейны, расположены параллельно друг другу и с одинаковой плотностью. Примером однородного магнитного поля может служить поле между разноименными магнитными полюсами двух постоянных магнитов, имеющих плоские торцовые поверхности, расположенные параллельно друг другу и на относительно небольшом расстоянии друг от друга (рис. 102).

§ 68. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Каждое магнитное поле характеризуется не только направлением в пространстве, но и своим магнитным состоянием. Механическая сила, действующая на один и тот же проводник с током, в одном магнитном поле может быть больше или меньше, чем в другом; энергия, запасенная в единице объема одного магнитного поля, может быть также больше или меньше, чем в другом поле, и т. д.

Мерой магнитного состояния магнитного поля является магнитная индукция. Чем больше магнитная индукция \vec{B} поля, тем при всех прочих одинаковых условиях больше механическая сила, действующая на проводник с током, помещенный в это поле, тем больше энергия, приходящаяся на единицу объема этого поля, и т. д.

Магнитная индукция — величина векторная. Это значит, что она характеризуется в каждой точке магнитного поля не только численным значением, но и направлением в пространстве.

Вектор магнитной индукции \vec{B} имеет в каждой точке магнитного поля направление, совпадающее с направлением касательной к магнитной линии, проходящей через эту точку (рис. 103). Следовательно, вектор магнитной индукции в каждой точке магнитного поля показывает направление этого поля. В соответствии с этим магнитные линии иначе называют линиями вектора магнитной индукции, так как по сути дела это одни и те же геометрические линии. Чтобы иметь представление о численном значении вектора магнитной индукции \vec{B} , необходимо рассмотреть какое-либо проявление магнитного поля, например действие механической силы на проводник с током, помещенный в это поле.

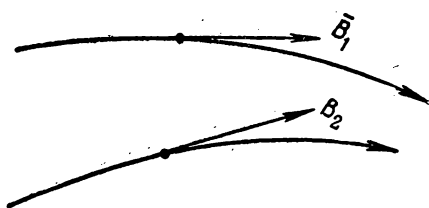


Рис. 103. Вектор магнитной индукции \vec{B} совпадает с направлением касательной к магнитной линии

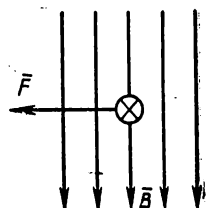


Рис. 104. Проводник с током в магнитном поле

Допустим, что в однородное магнитное поле (рис. 104) внесем прямолинейный проводник длиной l , по которому протекает постоянный ток I . Этот проводник с током I расположен в магнитном поле перпендикулярно магнитным линиям, и одновременно с этим он расположен перпендикулярно плоскости рисунка. Круг, изображенный на рис. 104, представляет собой площадь поперечного сечения данного проводника, а крестик, изображенный в кружке, показывает, что постоянный ток в проводнике направлен от нас за плоскость рисунка. Если бы этот ток был направлен из-за плоскости рисунка к нам, то в сечении проводника это направление тока было бы обозначено точкой.

Опытом установлено, что на проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует механическая сила F , которая в рассматриваемом нами случае направлена перпендикулярно проводнику с током I и магнитным линиям (рис. 104). Величина механической силы F , действующей на рассматриваемый нами проводник с током, пропорциональна величине магнитной индукции B , величине тока I , текущего по проводнику, и длине l этого проводника; в соответствии с этим она определяется по формуле

$$F = BIl, \quad (95)$$

где F — механическая сила;
 I — ток в проводе;
 l — длина провода;
 B — магнитная индукция.

Из формулы (95) получаем:

$$B = \frac{F}{Il}, \quad (96)$$

т. е. магнитная индукция численно равна механической силе, действующей на единицу длины провода, по которому протекает ток, равный единице.

Воспользовавшись формулой (96), выясним, какова размерность магнитной индукции в системе единиц МКСА

$$\begin{aligned} [B] &= \left[\frac{F}{Il} \right] = \frac{\text{ньютон}}{\text{ампер} \cdot \text{метр}} = \frac{\text{джоуль}}{\text{ампер} \cdot \text{кв. метр}} = \\ &= \frac{\text{вольт} \cdot \text{ампер} \cdot \text{сек.}}{\text{ампер} \cdot \text{кв. метр}} = \frac{\text{вольт} \cdot \text{секунда}}{\text{кв. метр}}, \end{aligned}$$

т. е. размерность магнитной индукции выражается в вольт-секундах на квадратный метр.

В соответствии с этим за единицу измерения магнитной индукции в системе единиц МКСА принята

$$1 \frac{\text{вольт-секунда}}{\text{кв. метр}} \left(1 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}, 1 \frac{\text{V-сек}}{\text{м}^2} \right).$$

Если в формуле (96) положить, что сила $F = 1$ ньютон, ток $I = 1$ ампер, длина провода $l = 1$ метр, то магнитная индукция B будет равна $1 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$:

$$B = \frac{F}{Il} = \frac{1}{1 \cdot 1} = 1 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}.$$

Следовательно, одна вольт-секунда на квадратный метр есть магнитная индукция такого однородного магнитного поля, в котором на прямолинейный провод длиной в один метр с током в один ампер, расположенный перпендикулярно магнитным линиям поля, действует сила, равная одному ньютону.

Пример 63. Определить магнитную индукцию однородного магнитного поля, если прямолинейный проводник длиной $l = 2$ м с током $I = 20$ а, направленный перпендикулярно к магнитным линиям поля, испытывает на себе действие механической силы $F = 32$ ньютона со стороны этого поля.

Решение. Применяя формулу (96), находим

$$B = \frac{F}{H} = \frac{32}{20 \cdot 2} = 0,8 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}.$$

Примечание. В абсолютной электромагнитной системе единиц СГСМ за единицу измерения магнитной индукции принят 1 гаусс (1 *гс*, *Gs*):

$$1 \text{ гаусс} = 10^{-4} \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}.$$

§ 69. МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Всякое вещество независимо от его природы способно в той или иной степени намагничиваться. Такие вещества, как воздух, вода, уголь, дерево, бумага, фарфор, стекло, медь, алюминий, цинк, свинец и т. д., намагничиваются весьма слабо, так что практически их намагничиванием можно пренебречь. Наоборот, такие вещества, как железо, никель, кобальт и некоторые сплавы, намагничиваются очень сильно и создают достаточно мощное собственное магнитное поле.

Величина, характеризующая способность тел намагничиваться, называется магнитной проницаемостью (μ).

Опытом установлено, что чем больше магнитная проницаемость μ среды, тем при прочих равных условиях в ней больше магнитная индукция.

Выясним размерность магнитной проницаемости μ и единицу измерения ее в системе единиц МКСА.

Исследования показали, что постоянный ток I , протекающий по бесконечно длинному прямолинейному проводу относительно малого сечения, создает магнитное поле, магнитная индукция которого пропорциональна величине тока I , протекающего по этому проводу, и обратно пропорциональна расстоянию r от оси провода до исследуемой точки поля. В соответствии с этим величина магнитной индукции B магнитного поля, создаваемого током I , протекающим по бесконечно длинному проводу, определяется по формуле

$$B = \mu \frac{I}{2\pi r}, \quad (97)$$

где μ — магнитная проницаемость среды, в которой находится данное магнитное поле;

$2\pi = 2 \cdot 3,14 = 6,28$ — постоянное число.

Из формулы (97) следует, что

$$\mu = \frac{2\pi r B}{I}. \quad (98)$$

Воспользовавшись формулой (98), выясним размерность магнитной проницаемости μ в системе единиц МКСА:

$$[\mu] = \left[\frac{2\pi r B}{I} \right] = \frac{\text{метр} \cdot \frac{\text{вольт-секунда}}{\text{кв. метр}}}{\text{ампер}},$$

или

$$[\mu] = \frac{\text{ом-секунда}}{\text{метр}} = \frac{\text{генри}}{\text{метр}},$$

т. е. магнитная проницаемость μ в системе единиц МКСА имеет размерность ом-секунда на метр или, иначе, генри на метр, так как 1 генри равен 1 ом-секунда.

В соответствии с этим за единицу измерения магнитной проницаемости μ в системе единиц МКСА принят 1 генри на метр — $1 \frac{\text{генри}}{\text{метр}} \left(1 \frac{\text{гН}}{\text{м}}, 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}\right)$.

Магнитная проницаемость $1 \frac{\text{гН}}{\text{м}}$ — весьма большая величина. Лучшие сорта магнитных сплавов обладают магнитной проницаемостью в сотые доли генри на метр.

Магнитная проницаемость вакуума равна

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7} \frac{\text{гН}}{\text{м}}.$$

В природе существуют вещества, которые имеют магнитную проницаемость большую, чем магнитная проницаемость вакуума, и меньшую.

Отвлеченное число, показывающее, во сколько раз магнитная проницаемость данного вещества больше магнитной проницаемости вакуума или какую ее долю она составляет, называется относительной магнитной проницаемостью μ_r .

Относительная проницаемость меди равна 0,999991, воздуха — 1,0000036, марганца — 1,0037 и т. д. Так называемые ферромагнитные вещества и некоторые специальные сплавы имеют относительную магнитную проницаемость, измеряемую сотнями, тысячами и десятками тысяч единиц. Об этих веществах будет подробно сказано в главе XVI «Магнитная цепь со сталью».

Если известна относительная магнитная проницаемость вещества μ_r , то его магнитную проницаемость можно вычислить по формуле

$$\mu = \mu_r \mu_0, \quad (99)$$

где μ — магнитная проницаемость вещества в генри на метр;

μ_r — относительная магнитная проницаемость вещества;

$\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7} \frac{\text{гН}}{\text{м}}$ — магнитная проницаемость вакуума.

Пример 64. Отожженное железо имеет относительную магнитную проницаемость $\mu_r = 7000$. Определить магнитную проницаемость этого железа.

Решение. Применяя формулу (99), находим

$$\mu = \mu_r \mu_0 = 7000 \cdot \frac{4\pi}{10^7} = 8,8 \cdot 10^{-3} \frac{2\pi}{\text{м}}.$$

Примечание. Магнитная проницаемость вакуума μ_0 в системе единиц СГСМ принята равной единице и является безразмерной величиной ($\mu_0 = 1$).

§ 70. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Магнитным потоком называется общее число магнитных линий, пронизывающих данную поверхность.

Допустим, что задано однородное магнитное поле, в котором, как известно, магнитные линии являются прямыми линиями, расположенными всюду параллельно друг другу и с одинаковой плотностью. Определим магнитный поток, пронизывающий плоскость, расположенную перпендикулярно магнитным линиям (рис. 105). Так как магнитная индукция численно равна магнитному потоку, приходящемуся на единицу плоскости, то весь магнитный поток равен произведению магнитной индукции на величину всей рассматриваемой плоскости, т. е.

$$\Phi = BS, \quad (100)$$

где Φ — магнитный поток;
 B — магнитная индукция;
 S — величина плоскости.

Воспользовавшись формулой (100), определим размерность магнитного потока в системе единиц МКСА:

$$[\Phi] = [BS] = \frac{\text{вольт-секунда} \cdot \text{кв. метр}}{\text{кв. метр}},$$

или

$$[\Phi] = \text{вольт-секунда}.$$

Следовательно, размерность магнитного потока в системе единиц МКСА выражается в вольт-секундах.

В соответствии с этим за единицу измерения магнитного потока в системе единиц МКСА принята 1 вольт-секунда (1 в-сек; 1 V-sec).

Если в формуле (100) положить, что $B = 1 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$ и $S = 1 \text{ кв. м}$, то получим

$$\Phi = 1 \cdot 1 = 1 \text{ в-сек},$$

т. е. одна вольт-секунда есть такой магнитный поток, который пронизывает плоскость в один квадратный метр, расположенную

перпендикулярно магнитным линиям однородного магнитного поля, обладающего магнитной индукцией, равной одной вольт-секунде на квадратный метр.

Примечание. В абсолютной электромагнитной системе единиц СГСМ за единицу измерения магнитного потока принят 1 максвелл (1 мкс; 1 Мх):

$$1 \text{ максвелл} = 10^{-8} \text{ вольт-секунда.}$$

Если магнитные линии однородного магнитного поля падают на плоскость под углом α (рис. 106), то величину магнитного

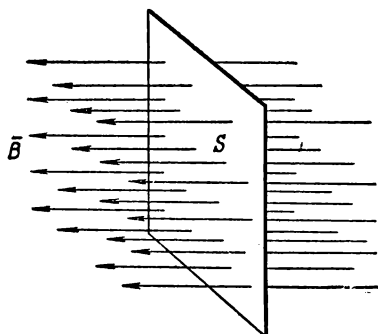


Рис. 105. Магнитные линии пересекают плоскость под прямым углом

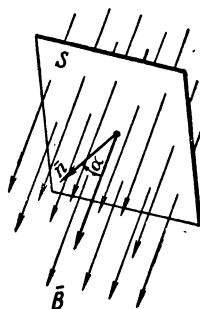


Рис. 106. Магнитные линии пересекают плоскость под углом α

потока, пронизывающего данную плоскость, можно определить по формуле

$$\Phi = BS \cdot \cos \alpha, \quad (101)$$

где Φ — магнитный поток в вольт-секундах;

B — магнитная индукция в вольт-секундах на квадратный метр;

α — угол, составленный магнитной линией с перпендикуляром (нормалью) к плоскости S ;

S — площадь в квадратных метрах.

Пример 65. Магнитные линии магнитного поля падают на плоскость под углом $\alpha = 60^\circ$ (рис. 106). Определить величину магнитного потока, пронизывающего эту плоскость, если ее односторонняя поверхность $S = 0,004 \text{ м}^2$, а магнитная индукция $B = 0,2 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$.

Решение. Применяя формулу (101), находим

$$\Phi = BS \cdot \cos \alpha = 0,2 \cdot 0,004 \cdot \cos 60^\circ = 4 \cdot 10^{-4} \text{ в-сек.}$$

Магнитные линии, или, иначе сказать, линии вектора магнитной индукции \vec{B} , всегда непрерывны, т. е. замкнуты на себя.

Следовательно, магнитный поток при переходе из одной среды в другую, имеющую иную магнитную проницаемость, не

должен изменяться по своей величине, магнитные линии при переходе через границу раздела двух сред никогда не разрываются.

Однако, как показывает опыт, магнитный поток при переходе через границу раздела двух сред с разными магнитными проницаемостями меняет свое направление. Его магнитные линии преломляются, и чем больше разница в величинах магнитной проницаемости этих сред, тем большее претерпевают преломление магнитные линии.

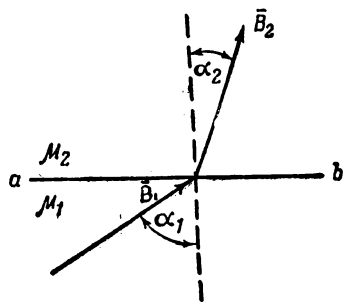


Рис. 107. Магнитная линия при переходе через плоскость раздела двух сред с различными магнитными проницаемостями преломляется

Допустим, что две однородные и неограниченные среды с магнитными проницаемостями, соответственно равными μ_1 и μ_2 , имеют границей своего раздела плоскость. На рис. 107 показана прямая линия ab , являющаяся линией пересечения плоскости рисунка с плоскостью раздела двух заданных сред. Предположим, что в среде с магнитной проницаемостью μ_1 магнитные линии (линии вектора магнитной индукции) падают на плоскость раздела двух заданных сред под углом α_1 . Это значит, что вектор магнитной индукции B_1 у поверхности раздела двух сред составляет угол α_1 с перпендикуляром к этой поверхности. Угол α_1 называется углом падения магнитной линии.

При переходе через плоскость раздела двух заданных сред магнитные линии как-то преломляются, и вектор магнитной индукции B_2 во второй среде (в среде с магнитной проницаемостью μ_2) составляет с перпендикуляром к плоскости раздела двух сред уже угол α_2 . Угол α_2 называется углом преломления магнитной линии.

Между углом падения и углом преломления магнитных линий существует строго определенная зависимость:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}}, \quad (102)$$

т. е. тангенс угла падения α_1 магнитной линии так относится к тангенсу угла преломления α_2 ее, как относительная магнитная проницаемость μ_{r1} первой среды относится к относительной магнитной проницаемости μ_{r2} второй среды.

Пример 66. Линии магнитной индукции в железе составляют угол $\alpha_1 = 45^\circ$ (угол падения) с перпендикуляром к плоскости раздела железа и воздуха. Требуется определить угол α_2 (угол преломления), составленный линией магнитной индукции в воздухе с перпендикуляром к плоскости раздела, если известно, что относительная магнитная проницаемость железа равна $\mu_{r\text{желез}} = 500$, а относительная магнитная проницаемость воздуха $\mu_{r0} = 1$.

Решение. Применяя формулу (102), находим

$$\frac{\operatorname{tg} 45^\circ}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{500}{1},$$

откуда

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\operatorname{tg} 45^\circ}{500} = \frac{1}{500} = 0,002.$$

По тригонометрическим таблицам находим, что для

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = 0,002 \text{ угол } \alpha_2 = 0^\circ 10',$$

т. е. линии магнитной индукции по выходе из железа в воздух направлены практически перпендикулярно плоскости железа.

§ 71. НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Наряду с магнитной индукцией для характеристики магнитных полей применяется вспомогательная расчетная величина, называемая напряженностью магнитного поля.

Напряженность магнитного поля — величина векторная. Вектор напряженности магнитного поля \vec{H} имеет в однородной неограниченной среде одинаковое направление с вектором магнитной индукции \vec{B} .

Соотношение численных значений векторов магнитной индукции B и напряженности магнитного поля H определяется по формуле

$$H = \frac{B}{\mu}, \quad (103)$$

где H — напряженность магнитного поля;

B — магнитная индукция;

μ — магнитная проницаемость среды.

Воспользовавшись формулой (103), выясним размерность напряженности магнитного поля в системе единиц МКСА:

$$[H] = \left[\frac{B}{\mu} \right] = \frac{\frac{\text{вольт-секунда}}{\text{кв. метр}}}{\frac{\text{генри}}{\text{метр}}} = \frac{\text{вольт-секунда}}{\text{ом-секунда} \cdot \text{метр}},$$

или

$$[H] = \frac{\text{ампер}}{\text{метр}},$$

т. е. размерность напряженности магнитного поля выражается в системе единиц МКСА в амперах на метр.

В соответствии с этим за единицу измерения магнитной индукции в системе единиц МКСА принят 1 ампер на метр ($1 \frac{\text{а}}{\text{м}}$).

Как известно, магнитная проницаемость вакуума $\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7} \frac{гн}{м}$. Следовательно, если в данной точке магнитного поля магнитная индукция в вакууме равна B_0 , то напряженность магнитного поля H_0 в этой точке поля равна

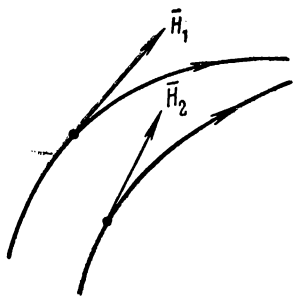
$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{\frac{4\pi}{10^7}} = \frac{10^7}{4\pi} B_0.$$

Если в последней формуле положить, что магнитная индукция в вакууме равна $B_0 = \frac{4\pi}{10^7} \frac{в-сек}{м^2}$, то напряженность магнитного поля в соответствующей точке вакуума будет равна одному амперу на метр:

$$H_0 = \frac{10^7}{4\pi} B_0 = \frac{10^7}{4\pi} \cdot \frac{4\pi}{10^7} = 1 \frac{а}{м}.$$

Следовательно, данная точка магнитного поля в вакууме (практически в воздухе) имеет напряженность 1 ампер на метр, если магнитная индукция в этой точке поля равна

$$B_0 = \frac{4\pi}{10^7} \frac{в-сек}{м^2}.$$



Примечание. В абсолютной электромагнитной системе единиц СГСМ за единицу напряженности магнитного поля принимается 1 эрстед (1 э, 1 Oe):

$$1 \text{ эрстед} = \frac{1000}{4\pi} \frac{а}{м} = 80 \frac{а}{м}.$$

Рис. 108. Линии вектора напряженности магнитного поля

Геометрическая линия, в любой точке которой вектор напряженности магнитного поля \vec{H} совпадает с касательной к этой линии (рис. 108), называется линией вектора напряженности магнитного поля или просто силовой линией магнитного поля. В однородных средах силовые линии магнитного поля совпадают по направлению с магнитными линиями, т. е. линиями вектора магнитной индукции \vec{B} .

ГЛАВА XV

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

§ 72. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ПРОТЕКАЮЩЕГО ПО ПРЯМОЛИНЕЙНОМУ ПРОВОДУ

Допустим, что в некоторую однородную среду помещен прямолинейный провод, по которому протекает постоянный ток I . Выясним, какова конфигурация и напряженность магнитного поля этого тока.

Опытом установлено, что магнитное поле относительно длинного прямолинейного провода с током аксиально симметрично, т. е. во всех точках поля, удаленных на одинаковые расстояния от оси провода, численное значение напряженности магнитного поля одинаково. Магнитные линии этого поля в любой плоскости, расположенной перпендикулярно проводу, представляют собой семейство концентрических окружностей с центром на оси провода (рис. 109).

Направление магнитного поля прямолинейного провода с током определяется правилом буравчика: если поступательное движение буравчика праввинтовой системы совпадает с направлением тока в проводе, то вращательное движение буравчика совпадает с направлением магнитных линий (рис. 110).

Напряженность магнитного поля вне прямолинейного провода конечных размеров (рис. 111), по которому протекает постоянный ток I , определяется по формуле

$$H = \frac{I}{4\pi r} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2), \quad (104)$$

где H — напряженность магнитного поля в амперах на метр;
 I — ток в амперах;

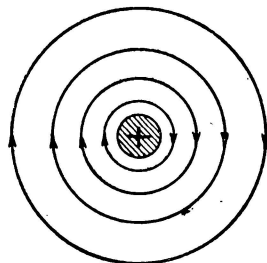


Рис. 109. Магнитное поле прямолинейного провода с током

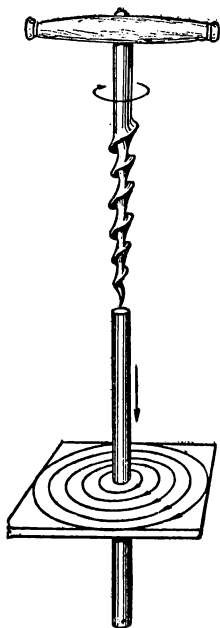


Рис. 110. Поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводе, вращательное — с направлением магнитных линий

r — расстояние от оси провода до исследуемой точки поля в метрах;

α_1 и α_2 — углы, составленные прямыми линиями, проведенными из исследуемой точки поля к концевым точкам прямолинейного участка провода, и перпендикуляром, опущенным на ось провода из точки M .

Пример 67. Задан прямолинейный провод с током $I = 6,28$ а. Определить напряженность магнитного поля вне провода на расстоянии

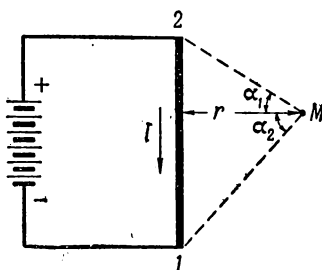


Рис. 111. Вектор напряженности магнитного поля в точке M направлен из-за плоскости чертежа на нас и перпендикулярен ей

$r = 0,02$ м от его оси, если положить, что углы на рис. 111 равны друг другу: $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$.

Решение. По формуле (104) находим

$$H = \frac{I}{4\pi r} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) = \frac{6,28}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,02} (0,5 + 0,5) = 25 \frac{a}{m}.$$

Если длина провода с током очень велика по сравнению с расстоянием от оси провода до исследуемой точки поля, то углы α_1 и α_2 будут близки к 90° и в соответствии с этим

$$\sin \alpha_1 = \sin \alpha_2 \approx \sin 90^\circ = 1.$$

Следовательно, для длинного прямолинейного провода с током I напряженность магнитного поля H в точках, расположенных вблизи провода и вне его, определяется по формуле

$$H = \frac{I}{2\pi r}. \quad (105)$$

Пример 68. Задан очень длинный прямой провод, по которому протекает ток $I = 25,12$ а; определить напряженность магнитного поля на расстоянии $r = 0,2$ м от оси провода.

Решение. По формуле (105) находим

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{25,12}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,2} = 20 \frac{a}{м}.$$

Если в формуле (105) положить $I = 1$ а и $r = \frac{1}{2\pi}$ м, то получим

$$H = \frac{I}{2\pi r} = \frac{1}{2\pi \frac{1}{2\pi}} = 1 \frac{a}{м}.$$

На основании последнего соотношения можно так определить единицу напряженности магнитного поля в системе МКСА: если в бесконечно длинном прямолинейном проводе ничтожно малого кругового сечения, помещенном в однородную и изотропную среду, протекает ток в 1 ампер, то в точках магнитного поля, удаленных от оси провода на расстояние $\frac{1}{2\pi}$ метра, напряженность магнитного поля равна 1 амперу на метр.

Примечание. Однородной и изотропной средой называется такая среда, которая по всем направлениям обладает одинаковыми физическими свойствами.

Теперь посмотрим, каково магнитное поле внутри прямолинейного провода с постоянным током I .

Магнитное поле внутри прямолинейного провода с током, как и вне его, аксиально симметрично. Магнитные линии этого поля в любой плоскости, расположенной перпендикулярно проводу с током, представляют собой семейство концентрических окружностей с центром на оси провода (рис. 112). Напряженность магнитного поля внутри провода одинакова для всех точек, равноудаленных от оси провода.

Однако в отличие от магнитного поля, расположенного вне прямолинейного провода с током, где напряженность поля изменяется обратно пропорционально расстоянию от оси провода, в магнитном поле, расположенном внутри провода, напряженность поля изменяется прямо пропорционально расстоянию от оси провода.

Величина напряженности магнитного поля внутри прямолинейного провода с током определяется по формуле

$$H = \frac{Ir}{2\pi R^2}, \quad (106)$$

где H — напряженность магнитного поля внутри прямолинейного провода в амперах на метр;

I — ток в проводе в амперах;

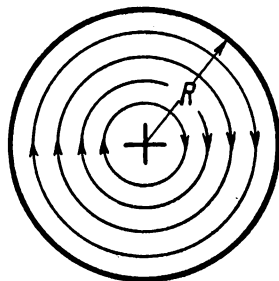


Рис. 112. Магнитное поле внутри провода круглого сечения радиусом R с током

R — радиус поперечного сечения провода в метрах;
 r — расстояние от оси провода до исследуемой точки про-
 вода в метрах.

Пример 69. По прямолинейному проводу радиусом $R = 4$ мм протекает постоянный ток $I = 15$ а. Требуется определить напряженность магнитного поля внутри провода на расстоянии $r = 2$ мм от оси провода.

Решение. Применяя формулу (106), находим

$$H = \frac{Ir}{2\pi R^2} = \frac{15 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 (4 \cdot 10^{-3})^2} \approx 300 \frac{а}{м}.$$

На рис. 113 показан график зависимости напряженности магнитного поля тока I , протекающего по прямолинейному проводу радиусом R , от расстояния r , отсчитываемого от оси провода. Здесь прямолинейный участок графика характеризует зависи-

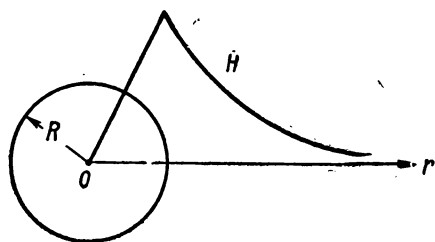


Рис. 113. График зависимости напряженности магнитного поля H от расстояния r от провода

мость H от r для поля внутри провода и криволинейный участок — зависимость H от r для поля вне провода.

В заключение отметим, что для определения магнитной индукции рассмотренного магнитного поля прямолинейного провода с током необходимо на напряженность магнитного поля умножить на магнитную проницаемость среды, так как $B = \mu H$,

§ 73. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОГО ТОКА

Допустим, что кольцо круглого сечения, по которому протекает постоянный ток I , расположено в однородной среде. На рис. 114 это кольцо показано в разрезе плоскости чертежа. Здесь мы видим, что в верхнем сечении кольца ток уходит от нас за плоскость рисунка (обозначено крестиком), а в нижнем сечении — к нам из-за плоскости рисунка (обозначено точкой).

Магнитные линии такого тока представляют собой замкнутые на себя кривые линии. Они выходят с левой стороны кольца, затем расходятся по внешнему пространству, сходятся на другой стороне кольца и замыкаются на себя внутри кольца.

Для определения направления магнитных линий внутри кольцевого тока применяется правило буравчика: если вращательное движение буравчика совпадает с направлением тока в кольце, то поступательное движение буравчика совпадает с направлением магнитного поля внутри кольца.

Установлено, что напряженность магнитного поля в любой точке оси кольцевого тока (рис. 115) определяется по формуле

$$H = \frac{I}{2R} \sin^3 \alpha, \quad (107)$$

где H — напряженность магнитного поля в амперах на метр;
 I — ток в амперах;
 R — радиус кольца в метрах;
 α — угол, составленный осью кольца с прямой линией, проведенной к средней линии кольца из точки, где определяется величина напряженности магнитного поля.

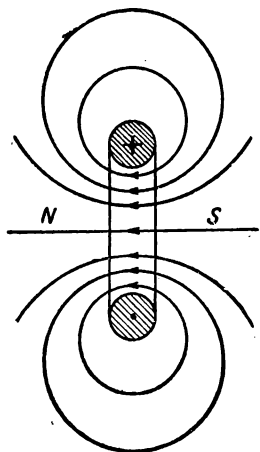


Рис. 114. Магнитное поле кольцевого тока

Пример 70. Определить напряженность магнитного поля на оси кольцевого тока (рис. 115), если известно, что ток в кольце $I = 20$ а, радиус кольца $R = 0,05$ м и $\alpha = 30^\circ$.

Решение. Применяя формулу (107), находим

$$H = \frac{I}{2R} \sin^3 \alpha =$$

$$= \frac{20}{2 \cdot 0,05} \sin^3 30^\circ = 200 \cdot 0,5^3 = 25 \frac{a}{m}.$$

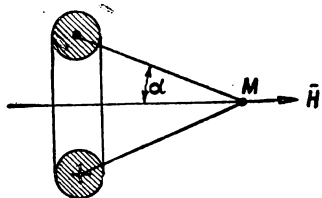


Рис. 115. Вектор напряженности магнитного поля \vec{H} в точке M направлен по оси вправо

В центре кольца на его оси угол $\alpha = 90^\circ$, а поэтому напряженность магнитного поля в центре кольца может быть определена по формуле

$$H = \frac{I}{2R}. \quad (108)$$

Пример 71. Определить напряженность магнитного поля в центре кольца на его оси, если известно, что радиус кольца $R = 0,1$ м, а ток в кольце $I = 25$ а.

Решение. Применяя формулу (108), находим

$$H = \frac{I}{2R} = \frac{25}{2 \cdot 0,1} = 125 \frac{a}{m}.$$

§ 74. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ОДНОСЛОЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАТУШКИ

Допустим, что цилиндрическая катушка с однослойной обмоткой, по которой протекает постоянный ток I , расположена в однородной среде. На рис. 116 катушка показана в разрезе плоскости чертежа. Ток в верхних сечениях витков катушки уходит от нас за плоскость рисунка, а в нижних сечениях витков течет к нам из-за плоскости рисунка.

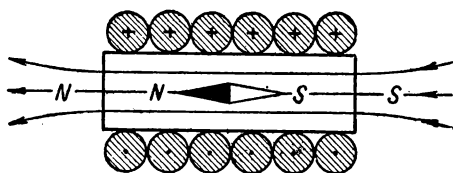


Рис. 116. Однослойная цилиндрическая катушка и ее магнитное поле

Магнитная стрелка, помещенная внутри катушки, показывает своим северным полюсом направление магнитного поля внутри катушки. Магнитные линии магнитного поля катушки в рассматриваемом случае выходят с левой торцевой стороны

катушки, затем, распространяясь по внешнему пространству, сходятся с другой торцевой стороны катушки, входят в ее внутреннюю плоскость и замыкаются на себя.

Та сторона катушки, из которой выходят магнитные линии, имеет северный магнитный полюс N , а противоположный конец катушки, куда стекаются магнитные линии,— южный магнитный полюс S .

Полярность магнитного поля катушки можно определить, применяя правило правой руки: если ладонь правой руки наложить на витки катушки так, чтобы вытянутые четыре пальца указывали направление тока в витках катушки, то отставленный большой палец укажет северный магнитный полюс катушки.

Установлено, что напряженность магнитного поля в произвольной точке M на оси рассматриваемой катушки (рис. 117) определяется по формуле

$$H = \frac{\omega I}{2l} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (109)$$

где H — напряженность магнитного поля в амперах на метр;

I — ток в амперах;

ω — число витков обмотки катушки;

l — длина катушки в метрах;

α — углы, составленные осью катушки с прямыми линиями, проведенными к конечному и начальному виткам катушки из точки, где определяется величина напряженности магнитного поля.

Пример 72. Определить напряженность магнитного поля однослойной цилиндрической катушки в некоторой точке M на оси ее (рис. 117), если известно, что ток в витках катушки $I = 1,2$ а, число витков катушки $\omega = 200$, длина катушки $l = 0,5$ м и углы $\alpha_1 = 60^\circ$ и $\alpha_2 = 90^\circ$.

Решение. Применяя формулу (109), находим

$$\begin{aligned} H &= \frac{\omega I}{2l} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = \\ &= \frac{200 \cdot 1,2}{2 \cdot 0,5} (\cos 60^\circ - \cos 90^\circ) = \\ &= 240 (0,5 - 0) = 120 \frac{\text{а}}{\text{м}}. \end{aligned}$$

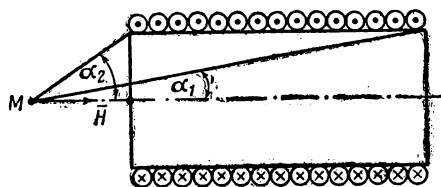


Рис. 117. Напряженность магнитного поля H в точке M на оси соленоида с током

Если однослойная цилиндрическая катушка имеет значительно бóльшую длину по сравнению с радиусом ее поперечного сечения (радиусом ее витков), то напряженность магнитного поля внутри катушки, в точках на оси ее, может быть определена по формуле

$$H = \frac{wl}{l}. \quad (110)$$

Пример 73. Определить напряженность магнитного поля внутри относительно длинной цилиндрической катушки, если известно, что число витков катушки $w = 200$, длина катушки $l = 0,4$ м и ток в катушке $I = 0,25$ а.

Решение. Применяя формулу (110), находим

$$H = \frac{wl}{l} = \frac{200 \cdot 0,25}{0,4} = 125 \frac{a}{м}.$$

Произведение числа витков катушки на величину тока, протекающего по ним, называется ампер-витками катушки.

Из формулы (110) следует, что напряженность магнитного поля катушки с током равна числу ампер-витков катушки, приходящихся на единицу длины катушки. В соответствии с этим единицу измерения напряженности магнитного поля называют также 1 ампер-виток на метр и при этом считают, что 1 ампер на метр = 1 ампер-виток на метр $\left(1 \frac{a}{м} = 1 \frac{a \cdot \theta}{м}\right)$.

Число ампер-витков на метр называют удельными ампер-витками и обозначают условно символом $a\omega$, т. е.

$$H = a\omega \left(\frac{a \cdot \theta}{м}\right).$$

ГЛАВА XVI

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ СО СТАЛЬЮ

§ 75. НАМАГНИЧИВАНИЕ ПАРАМАГНИТНЫХ И ДИАМАГНИТНЫХ ВЕЩЕСТВ

Всякий электрический ток, будь то ток проводимости, ионный ток, ток смещения или молекулярные токи в веществе, создает магнитное поле.

Рассмотрим, какое влияние оказывают молекулярные токи вещества на процесс намагничивания этого вещества.

Известно, что в каждом атоме имеются электроны, которые вращаются вокруг ядра. Эти круговые движения электронов в атомах можно уподобить элементарным кольцевым токам с присущими им магнитными свойствами. Каждый такой элементарный кольцевой ток, или, иначе, молекулярный ток, создает свое собственное магнитное поле с явно выраженными магнитными полюсами.

Если все молекулярные токи в веществе расположены так, что их результирующее поле равно нулю, то такое вещество не намагничено (рис. 118, *а*).

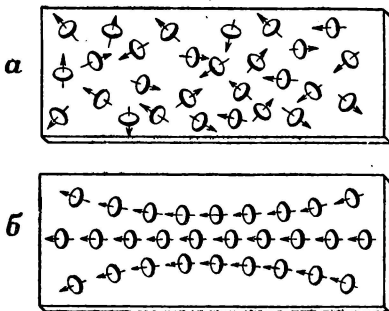


Рис. 118. Расположение элементарных кольцевых токов в железе: *а* — при их собственном результирующем магнитном поле, равном нулю; *б* — при воздействии внешнего магнитного поля

Если же на молекулярные токи вещества воздействовать внешним магнитным полем и тем самым заставить их определенным образом ориентироваться в этом поле (рис. 118, *б*), то такое вещество намагнитится, т. е. станет само источником магнитного поля.

Помимо вращательного движения электрона вокруг ядра атома, наблюдается также его вращательное движение вокруг собственной оси — так называемый спин электрона. В результате этого вращатель-

ного движения электрон создает также магнитное поле. В данном случае электрон со своим магнитным полем напоминает элементарный магнитик с явно выраженными магнитными полюсами. На рис. 119 схематически показан вращающийся вокруг собственной оси электрон (спин электрона) с явно выраженными магнитными полюсами. Следовательно, спин электрона можно рассматривать как некоторую разновидность молекулярного тока в атомах вещества.

Установлено, что орбиты, по которым движутся электроны в атомах, непрерывно изменяют положение своих плоскостей в пространстве. Если на вещество воздействовать внешним магнитным полем, то оси электронных орбит будут совершать вращательное движение вокруг направления этого поля, т. е. возникнет так называемое прецессионное движение электронных орбит внутри атома (рис. 120). Это дополнительное движение электрона в атоме, связанное с прецессионным движением его орбиты, создает также магнитное поле, которое направлено навстречу внешнему магнитному полю. Следовательно, прецессионное движение орбит электронов в атоме тоже можно рассматривать как своеобразные молекулярные токи в атоме.

Таким образом, молекулярные токи в веществе могут быть обусловлены различными причинами. При этом характер намагничения вещества зависит от того, какая разновидность молекулярных токов и в какой степени преобладает в элементарных частицах вещества при его намагничивании.

Если молекулярные токи в веществе ориентируются так, что создаваемое ими магнитное поле усиливает внешнее магнитное

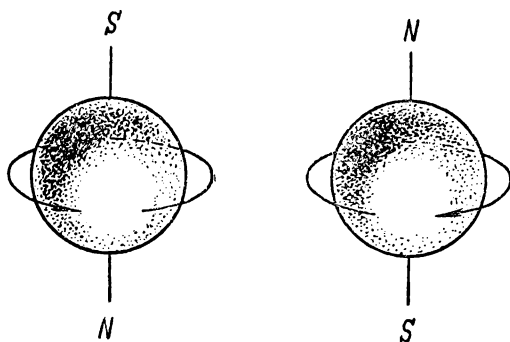


Рис. 119. Спин электрона

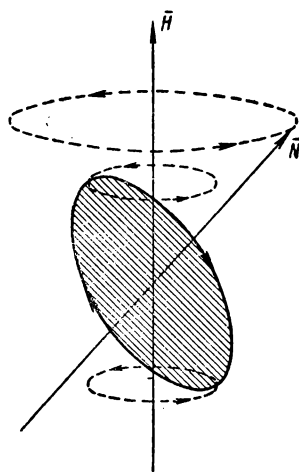


Рис. 120. Прецессионное движение электронной орбиты

поле, намагничивающее вещество, то такое явление называется парамагнетизмом, а вещества, в которых это явление наблюдается, называются парамагнитными. К парамагнитным веществам относятся вольфрам, марганец, платина и ряд других веществ.

Если молекулярные токи в веществе ориентируются в основном так, что создаваемое ими магнитное поле ослабляет внешнее магнитное поле, намагничивающее вещество, то такое явление называется диамагнетизмом, а вещества, в которых это явление наблюдается, называются диамагнитными. К диамагнитным веществам относятся медь, серебро, углерод, кадмий, висмут и ряд других веществ.

Итак, при расчете магнитных полей в веществе приходится учитывать не только внешние магнитные поля, осуществляющие намагничивание веществ, но и магнитные поля, создаваемые молекулярными токами вещества.

Выясним, каково будет результирующее магнитное поле в веществе, если в нем создать внешнее магнитное поле.

Допустим, что в некотором однородном веществе возникло внешнее магнитное поле, напряженность которого равна H . Под влиянием этого поля вещество намагнитилось, т. е. его молекулярные токи как-то ориентировались во внешнем магнитном поле и создали свое собственное магнитное поле, которое назовем внутренним магнитным полем. Последнее, наложившись на внешнее магнитное поле, создает совместно с ним некоторое результирующее магнитное поле.

Величина магнитной индукции результирующего магнитного поля в веществе может быть определена по формуле

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H} + \bar{J}, \quad (111)$$

где \bar{B} — вектор магнитной индукции результирующего магнитного поля в веществе;

$\mu_0 \bar{H}$ — вектор магнитной индукции внешнего магнитного поля в веществе;

μ_0 — магнитная проницаемость вакуума;

\bar{H} — вектор напряженности внешнего магнитного поля;

\bar{J} (читать «иот») — магнитная индукция, создаваемая молекулярными токами вещества, называемая намагниченностью вещества.

Из формулы (111) следует, что вектор магнитной индукции \bar{B} результирующего магнитного поля в веществе равен геометрической сумме вектора магнитной индукции $\mu_0 \bar{H}$ внешнего магнитного поля, имеющегося в веществе, и вектора магнитной индукции \bar{J} (намагниченности) магнитного поля, создаваемого молекулярными токами вещества.

Если векторы \vec{B} , $\mu_0 \vec{H}$ и \vec{J} совпадают по направлению, что чаще всего наблюдается в веществах, то равенство (111) можно записать не в векторной форме:

$$B = \mu_0 H + J. \quad (112)$$

Но, как известно, магнитная индукция B в любой среде равна произведению напряженности H магнитного поля в этой среде на магнитную проницаемость μ этой среды, т. е.

$$B = \mu H.$$

Подставив данное выражение в формулу (112), получим

$$\mu H = \mu_0 H + J.$$

Отсюда находим, что

$$\mu = \mu_0 + \frac{J}{H}, \quad (113)$$

т. е. магнитная проницаемость вещества равняется сумме магнитной проницаемости вакуума μ_0 и некоторой добавочной магнитной проницаемости, численно равной отношению намагниченности J к напряженности H внешнего магнитного поля.

Так как магнитная проницаемость вакуума равна μ_0 , то, исходя из формулы (113), получим

$$\mu_0 = \mu_0 + \frac{J_0}{H}, \text{ или } \frac{J_0}{H} = 0 \text{ и } J_0 = 0,$$

т. е. намагниченность J_0 вакуума равна нулю. Это понятно, так как в вакууме нет собственных молекулярных токов.

Для парамагнитных и диамагнитных веществ намагниченность J пропорциональна напряженности H внешнего магнитного поля:

$$J = \chi H, \quad (114)$$

где χ (читать «каппа») — коэффициент пропорциональности, называемый магнитной восприимчивостью вещества.

Подставив вместо J его выражение из формулы (114) в формулу (113), получим

$$\mu = \mu_0 + \frac{\chi H}{H},$$

или

$$\mu = \mu_0 + \chi. \quad (115)$$

Для парамагнитных веществ магнитная восприимчивость $\chi > 0$, и в соответствии с этим магнитная проницаемость их больше магнитной проницаемости вакуума ($\mu > \mu_0$). Наоборот,

для диамагнитных веществ магнитная восприимчивость $\chi < 0$, и в соответствии с этим магнитная проницаемость диамагнитных веществ меньше магнитной проницаемости вакуума ($\mu < \mu_0$).

Если равенство (115) разделить почленно на μ_0 , то получим

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \frac{\chi}{\mu_0},$$

или

$$\mu_r = 1 + \frac{\chi}{\mu_0}, \quad (116)$$

где μ_r — относительная магнитная проницаемость вещества;

$\frac{\chi}{\mu_0}$ — относительная магнитная восприимчивость вещества.

Для парамагнитных веществ относительная магнитная проницаемость больше единицы, а для диамагнитных веществ — меньше единицы. В табл. 25 приведены относительные магнитные проницаемости некоторых парамагнитных и диамагнитных веществ.

Таблица 25

Относительные магнитные проницаемости некоторых сред

Парамагнитное вещество	Магнитная проницаемость	Диамагнитное вещество	Магнитная проницаемость
Воздух	1,00000036	Висмут	0,999825
Олово	1,000004	Графит	0,999895
Алюминий	1,000023	Сурьма	0,999937
Иридий	1,000063	Ртуть	0,999975
Платина	1,000364	Серебро	0,999981
Палладий	1,00069	Цинк	0,999989
Марганец	1,0037	Медь	0,999991

§ 76. НАМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ВЕЩЕСТВ

Особый интерес для практики представляют так называемые ферромагнитные вещества, так как намагниченность их весьма значительно превышает намагниченность обычных парамагнитных веществ. К ферромагнитным веществам относятся железо, сталь, чугун, никель, кобальт и некоторые сплавы.

Если в ферромагнитном веществе создать внешнее магнитное поле, то это вещество намагнитится, т. е. образует собственное магнитное поле за счет действия своих молекулярных токов. Магнитная индукция результирующего магнитного поля в этом случае будет равна

$$\bar{B} = \mu_0 \bar{H} + \bar{J}, \quad (117)$$

где \vec{B} — вектор магнитной индукции результирующего магнитного поля;

$\mu_0 \vec{H}$ — магнитная индукция внешнего магнитного поля;

\vec{J} — вектор намагниченности (магнитная индукция, создаваемая молекулярными токами вещества).

В отличие от парамагнитных веществ намагниченность J ферромагнитных веществ не пропорциональна напряженности внешнего магнитного поля.

На рис. 121 показана кривая $Oa_1b_1c_1$ зависимости намагниченности J ферромагнитного вещества от напряженности H внешнего магнитного поля в веществе. Эта кривая показывает, что

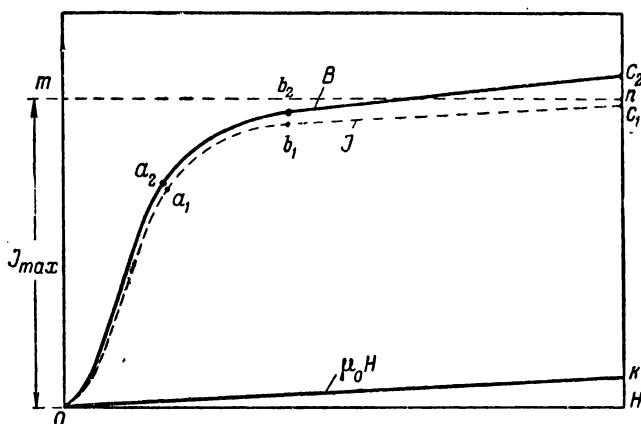


Рис. 121. Кривые зависимости намагниченности J и магнитной индукции B ферромагнитного вещества от напряженности внешнего магнитного поля H

при относительно малых значениях напряженности H внешнего магнитного поля намагниченность J вещества растет весьма интенсивно и пропорционально напряженности H внешнего магнитного поля (участок кривой Oa_1). Это объясняется тем, что молекулярные токи еще слабо ориентированы во внешнем магнитном поле и в соответствии с этим еще слабо противодействуют силам внешнего магнитного поля, осуществляющего поворот этих токов. Затем по мере намагничивания вещества скорость нарастания его намагниченности J начинает спадать (участок кривой a_1b_1). Это объясняется тем, что уже значительная часть молекулярных токов ориентирована соответствующим образом во внешнем магнитном поле и дальнейший поворот этих токов сопряжен с большим противодействием их силам внешнего магнитного поля. И, наконец, рост намагниченности J настолько снижается, что кривая J переходит в прямую линию, имеющую от-

носительно малый наклон по отношению к горизонтальной оси OH . Это объясняется тем, что в ферромагнитном веществе наступает состояние магнитного насыщения, при котором величина намагниченности J постепенно приближается к своему предельному значению J_{\max} , изображенному на рис. 121 прямой пунктирной линией mn .

Что же касается составляющей магнитной индукции $\mu_0 H$ внешнего магнитного поля, то она изменяется пропорционально напряженности H этого поля. На рис. 121 эта зависимость показана прямой линией Ok .

Чтобы получить кривую зависимости магнитной индукции B результирующего магнитного поля от напряженности H внешнего магнитного поля, необходимо сложить величины $\mu_0 H$ и J и

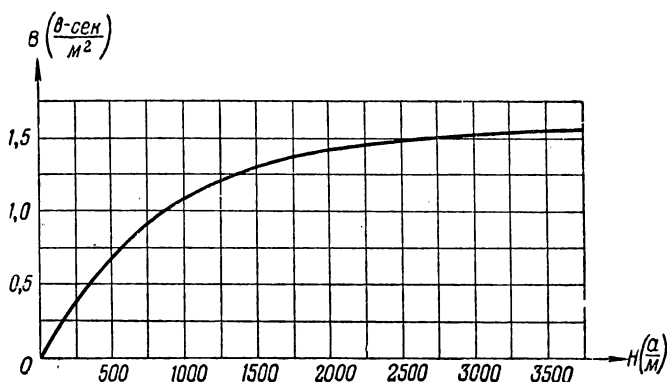


Рис. 122. Кривая намагничивания стали

затем по полученным точкам построить кривую зависимости B от H . На рис. 121 эта зависимость изображена кривой $Oa_2b_2c_2$, называемой первоначальной кривой намагничивания. Эта кривая напоминает кривую зависимости намагниченности J от H . Здесь также имеется начальный участок Oa_2 кривой, где магнитная индукция растет весьма быстро вместе с ростом H и изменяется почти пропорционально последней. Затем рост магнитной индукции B замедляется (участок кривой a_2b_2). И, наконец, когда наступает магнитное насыщение, магнитная индукция растет еще медленнее и изменяется почти пропорционально H . Однако в отличие от намагниченности J магнитная индукция B растет до тех пор, пока растет величина H . Это понятно, так как при прекращении роста намагниченности J величина $\mu_0 H$ продолжает расти вместе с ростом величины H .

На рис. 122 приведена кривая первоначального намагничивания электротехнической стали, широко применяемой в современной практической электротехнике.

Ниже приведена табл. 26 характеристик намагничивания некоторых ферромагнитных материалов, применяемых в электротехнической промышленности.

Таблица 26

Характеристики намагничивания материалов

Магнитная индукция B $\frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$	Напряженность магнитного поля H $\frac{\text{а}}{\text{м}}$			
	электротехническая сталь марки Э42	электротехническая сталь марки Э11	мягкая кованая сталь марки Ст2	чугун
0,1	—	—	80	600
0,2	21	87	160	900
0,3	29	113	240	1220
0,4	37	140	320	1640
0,5	48	171	400	2200
0,6	63	211	488	2940
0,7	84	261	584	3920
0,8	110	318	682	5400
0,9	140	397	798	7360
1,0	185	502	924	10100
1,1	260	647	1090	14000
1,2	380	843	1290	19200
1,3	680	1140	1590	26200
1,4	1450	1580	2090	34800
1,5	3100	2500	2890	47800
1,6	5600	4370	4100	—
1,7	9500	7780	—	—
1,8	14600	12800	—	—
1,9	23000	19700	—	—
2,0	41000	31000	—	—

Из табл. 26 видно, как значительно различаются характеристики намагничивания приведенных в ней ферромагнитных веществ. Так, например, чтобы иметь магнитную индукцию в стали марки Э42, равную $1,0 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$, необходимо создать в ней напряженность внешнего магнитного поля, равную $185 \frac{\text{а}}{\text{м}}$, а для того чтобы получить такую же магнитную индукцию в чугуне, необходимо создать в нем напряженность внешнего магнитного поля, равную $10100 \frac{\text{а}}{\text{м}}$.

Выяснив характер изменения магнитной индукции в ферромагнитном веществе в зависимости от напряженности внешнего магнитного поля, перейдем к рассмотрению зависимости магнитной проницаемости μ ферромагнитных веществ от напряженности H внешнего магнитного поля.

Как известно, магнитная проницаемость любого вещества равна

$$\mu = \frac{B}{H}.$$

Но так как согласно формуле (117)

$$B = \mu_0 H + J,$$

то можно написать, что

$$\mu = \mu_0 + \frac{J}{H}. \quad (118)$$

Из формулы (118) следует, что магнитная проницаемость μ ферромагнитного вещества зависит от отношения намагниченности J к напряженности H внешнего магнитного поля в нем. Вначале, когда $H = 0$ и $J = 0$, магнитная проницаемость ферромагнитного вещества равна магнитной проницаемости вакуума ($\mu = \mu_0$). Затем по мере роста H намагниченность J растет весьма быстро, и в соответствии с этим также быстро растет отношение $\frac{J}{H}$, а вместе с ним и магнитная проницаемость μ .

Когда отношение $\frac{J}{H}$ становится максимальным, достигает максимального значения и магнитная проницаемость μ . После этого рост отношения $\frac{J}{H}$ замедляется и при $H \rightarrow \infty$ это отношение стремится к нулю, поскольку $J \rightarrow J_{\max}$ как некоторой конечной величине.

Магнитная проницаемость в этом случае стремится к величине, равной магнитной проницаемости вакуума ($\mu = \mu_0$).

Если разделить левую и правую части равенства на μ_0 , получим

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \frac{J}{\mu_0 H}, \quad (119)$$

где μ_r — относительная магнитная проницаемость вещества.

Из формулы (119) следует, что в совершенно размагниченном ферромагнитном веществе относительная магнитная проницаемость его $\mu_r = 1$. Затем в соответствии с ростом отношения $\frac{J}{\mu_0 H}$ она растет, достигает некоторого максимума, а затем спадает, стремясь при магнитном насыщении к единице ($\mu_r \rightarrow 1$). На рис. 123 приведен график зависимости относительной магнитной проницаемости μ стали от напряженности H внешнего магнитного поля.

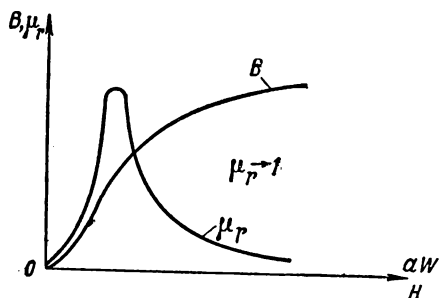


Рис. 123. Кривая зависимости магнитной индукции B и магнитной проницаемости μ стали от напряженности внешнего магнитного поля H

В табл. 27 приведены предельные значения магнитных проницаемостей некоторых ферромагнитных веществ.

Таблица 27

Магнитная проницаемость ферромагнитных веществ

Ферромагнитное вещество	μ_r	Примечание
Кобальт	174	
Чугун неотожженный	240	
Чугун отожженный	620	
Никель	1 120	
Мягкая сталь	2 180	
Железо отожженное	7 000	
Трансформаторная листовая сталь	7 500	
Электролитическое железо, плавленное в вакууме	12 950	
Сплав железа с никелем	60 000	Fe 20%, Ni 74%, Cu 5%, Mn 1%
Пермаллой „С“	115 000	Ni 78%, Fe 18%, Mo 3%, Mn 0,5%

Сложная зависимость магнитной проницаемости ферромагнитного вещества от напряженности внешнего магнитного поля и изменение ее в весьма широких пределах значительно затрудняет расчеты магнитных полей в ферромагнитных веществах. Поэтому при расчете магнитных полей в ферромагнитных веществах прибегают к кривым намагничивания веществ, т. е. к кривым зависимости магнитной индукции B в веществе от напряженности H внешнего магнитного поля.

Кривые намагничивания железа впервые были построены русским ученым **А. Г. Столетовым**. В своей докторской диссертации «Исследование функции намагничения мягкого железа» он впервые установил, что по мере увеличения намагничивающей силы магнитная проницаемость железа сначала растет, достигает максимума и потом вновь убывает. Столетов писал: «...изучение функции намагничивания железа может иметь практическую важность при устройстве и употреблении как электромагнитных двигателей, так и тех магнитоэлектрических машин нового рода (т. е. динамомашин), в которых временное намагничивание железа играет главную роль».

Научные работы А. Г. Столетова в области исследования намагничивания железа имели громадное значение для развития электротехники.

§ 77. ЦИКЛИЧЕСКОЕ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ

Если изменять напряженность магнитного поля в стали, то одновременно с этим будет изменяться магнитная проницаемость

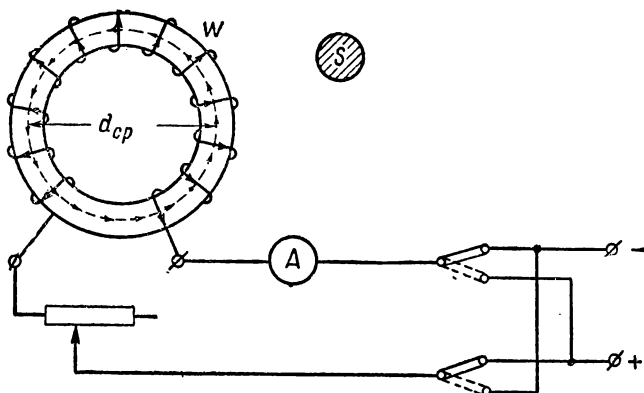


Рис. 124. Торoidalная катушка в цепи постоянного тока

и магнитная индукция в ней. Проследим, как будет изменяться магнитная индукция в стали, если напряженность магнитного поля изменяется по величине и направлению.

Допустим, что имеется торoidalная катушка (рис. 124), сердечником которой является стальной тороид — стальное кольцо. Напряженность магнитного поля, создаваемая такой катушкой, как и очень длинного цилиндрического соленоида, определяется формулой

$$H = \frac{wI}{l}, \quad (120)$$

где l — средняя длина силовой линии в тороиде в метрах (показана на рис. 124 пунктиром).

Магнитная индукция в тороиде будет равна

$$B = \mu H = \frac{wI\mu}{l}. \quad (121)$$

Если изменять величину тока в обмотке торoidalной катушки, то в соответствии с этим будет изменяться напряженность магнитного поля H и магнитная индукция B сердечника. Величину тока можно измерить амперметром, а напряженность магнитного поля подсчитать по формуле (120). Магнитную индукцию B снимают обычно специальными приборами.

Если сталь довести до состояния насыщения, например, магнитную индукцию довести до величины B_m (точка A на кривой рис. 125), а затем начать размагничивать сталь, уменьшая ток I и, следовательно, напряженность магнитного поля H , то и величина магнитной индукции B начнет также уменьшаться. Но падение величины магнитной индукции будет совершаться не по кривой первоначального намагничивания, а по некоторой кривой AC , расположенной выше нее.

Когда ток и соответственно с ним напряженность магнитного поля уменьшатся до нуля, магнитная индукция еще не достигнет нулевого значения, а сохранит некоторую величину, определяемую отрезком OC . Величиной этого отрезка определяется так называемая **остаточная магнитная индукция B_r** . Чтобы сталь размагнитить полностью, необходимо в обмотку катушки пропустить ток противоположного направления по сравнению с предыдущим. При некотором значении напряженности магнитного поля, определяемой отрезком OD , вновь образовавшееся магнитное поле полностью скомпенсирует остаточный магнетизм, и сталь сердечника будет совершенно размагничена. Чем больше отрезок OD , тем больше надо затратить энергии, чтобы освободить сталь от остаточного магнетизма. Отрезок OD характеризует собой сопротивляемость стали размагничиванию и называется **задерживающей силой** (коэрцитивной силой) намагниченного вещества.

Увеличивая напряженность H в новом направлении, заставим магнитную индукцию возрасти, добываясь состояния насыщения (B_m), соответствующего точке E . Затем, размагничивая сталь, при $H = 0$ получим остаточную магнитную индукцию, определяемую отрезком OF .

Изменяя направление тока и увеличивая его, добьемся того, что сталь размагнитится при напряженности магнитного поля, соответствующей отрезку OG , и при дальнейшем увеличении H достигнет вновь точки A на первоначальной кривой намагничивания.

При дальнейшем повторении процесса перемагничивания стали изменение магнитной индукции повторится по замкнутой кривой $ACDEFGA$, называемой циклической кривой перемагничивания.

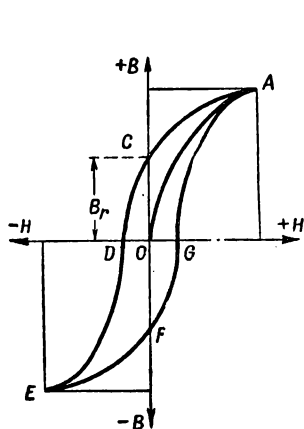


Рис. 125. Циклическая кривая перемагничивания

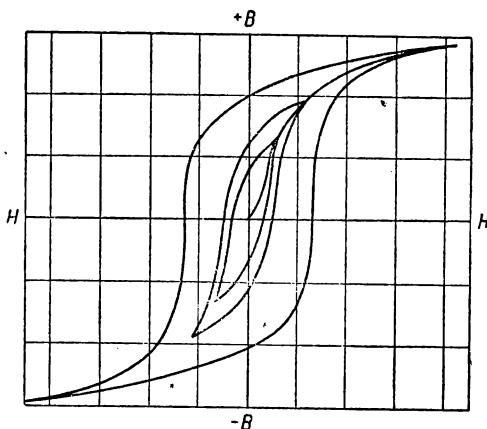


Рис. 126. Семейство циклических кривых перемагничивания

В рассмотренном процессе перемагничивания материала происходило запаздывание намагничивания материала (магнитной индукции) от намагничивающей силы (напряженности магнитного поля). Это явление называется гистерезисом. В соответствии с этим циклическую кривую перемагничивания стали часто называют петлей гистерезиса.

Если ограничить намагничивание и размагничивание стали другими пределами напряженности магнитного поля (рис. 126), то получится серия кривых перемагничивания для данного материала. Нетрудно видеть, что здесь одно и тому же значению H стали может соответствовать много различных значений магнитной индукции, так как последняя зависит не только от сорта стали, но и от предыдущего ее магнитного состояния. Эта многозначная зависимость B от H заставляет прибегать к графическому методу определения ее при помощи кривых намагничивания.

Кривая линия OA (рис. 125), являющаяся геометрическим местом вершин циклических кривых перемагничивания (петель гистерезиса), называется основной кривой намагничивания.

Перемагничивание ферромагнитных веществ связано с потерей энергии генератора электрической энергии, ток которого осуществляется перемагничивание вещества. Эта энергия преобразуется в ферромагнитном веществе в тепловую, доказательством чего служит его нагревание при перемагничивании.

Установлено, что количество энергии, израсходованной генератором электрической энергии на необратимый процесс (преобразование электрической энергии в тепловую) за полный цикл перемагничивания, пропорционально площади, ограниченной циклической кривой перемагничивания, — площади петли гистерезиса (рис. 125). Следовательно, во избежание непроизводительных затрат на перемагничивание стали необходимо выбирать ферромагнитные вещества с относительно малой площадью петли гистерезиса.

§ 78. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Ферромагнитные вещества, обладающие высокими магнитными качествами, нашли самое широкое применение в электротехнике.

Магнитные материалы, применяемые в электротехнике, подразделяются на две основные группы: магнитно-мягкие и магнитно-твердые материалы.

1. Магнитно-мягкие материалы. Отличительная особенность магнитно-мягких материалов — высокая магнитная проницаемость μ и малая задерживающая (коэрцитивная) сила H_c . Вследствие этого из таких материалов обычно изготавливаются сердечники электромагнитов, полюсные наконечники и т. п.

К магнитно-мягким материалам предъявляется требование высокой магнитной проницаемости: в них при относительно малых значениях напряженности H магнитного поля должна быть относительно большая величина магнитной индукции B . Однако при больших значениях переменной магнитной индукции в сердечниках электромагнитов довольно велики потери энергии на вихревые токи и на перемагничивание. Для уменьшения их сердечники электромагнитов, трансформаторов и т. д. выполняют не из сплошного ферромагнитного материала, а из отдельных тонких изолированных друг от друга листов и, кроме того, добавляют в сталь несколько процентов кремния, значительно увеличивая этим ее удельное сопротивление.

В современной электротехнике широко применяется магнитно-мягкая легированная кремнием листовая сталь, называемая электротехнической сталью.

В табл. 28 приведены некоторые основные магнитные характеристики электротехнической стали.

Таблица 28

Основные характеристики некоторых типов электротехнической стали

Марка стали	Удельное сопротивление, $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Содержание кремния, %	Магнитная индукция B $\frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$				
			при $H = 800 \frac{\text{а}}{\text{м}}$	при $H = 2000 \frac{\text{а}}{\text{м}}$	при $H = 4000 \frac{\text{а}}{\text{м}}$	при $H = 8000 \frac{\text{а}}{\text{м}}$	при $H = 16000 \frac{\text{а}}{\text{м}}$
Э11	0,25	0,8—1,8	—	1,5	1,62	1,75	1,97
Э12	0,25	0,8—1,8	—	1,49	1,61	1,74	1,96
Э21	0,40	1,8—2,8	—	1,48	1,59	1,73	1,94
Э31	0,50	2,8—4,0	—	1,46	1,57	1,7	1,9
Э41	0,57	4,0—4,8	1,3	1,45	1,56	1,68	1,88
Э42	0,57	4,0—4,8	1,29	1,44	1,55	1,67	1,87
Э43	0,57	4,0—4,8	1,28	1,43	1,54	1,66	1,87
Э310	0,50	2,8—4,0	1,57	1,7	1,8	1,9	1,98
Э320	0,50	2,8—4,0	1,65	1,8	1,87	1,92	2,0
Э330	0,50	2,8—4,0	1,7	1,85	1,9	1,95	2,0

Среди магнитно-мягких материалов, применяемых в технике связи, особое значение приобрели так называемые магнитодиэлектрики. Они очень хорошо проводят магнитные потоки, но в то же время обладают малой электропроводностью, что значительно снижает в них потери энергии при переменных токах высокой частоты.

Магнитодиэлектрики изготавливаются из мелкого железного порошка, частицы которого связаны электроизолирующим лаком.

На практике существует много различных магнитодиэлектриков. Из них наибольшее распространение получили карбонильные

Основные характеристики некоторых

Наименование материала	Начальная относительная магнитная проницаемость μ_r	Максимальная относительная магнитная проницаемость $\mu_r \max$
Электролитическое железо	500—600	15 000
Карбонильное железо	2000—3000	20 000—21 500
Армко-железо (после отжига 900° Ц)	250—350	3000—7000
Пермаллой (78,5% Ni, 21,5% Fe)	10 000—20 000	100 000
Пермаллой хромистый (78,5% Ni, 3,8% Cr и др.)	12 000	62 000—100 000
Пермаллой молибденовый (78,5% Ni, 3,8% Mo и др.)	8000—15 000	70 000—140 000
Гайперник	2000—3500	70 000—90 000
Альсифер (84,9% Fe, 9,5% Si, 5,6% Al)	10 000—35 000	110 000
Белый чугун	—	186
Серый чугун	—	180

магнитно-мягких материалов

Остаточная магнитная индукция B_r $\frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$	Магнитная индукция насыщения $B_{\text{н ах}}$ $\frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$	Задерживающая (коэци- тивная) сила H_c $\frac{\text{а}}{\text{м}}$	Область применения
0,5	—	16—28,6	Сердечники высокой частоты
0,6	2,03	6,4—8,0	Сердечники большой чувствительности
1,2	1,8 ÷ 2,0	56—136	Сердечники реле и трансформаторов
0,8—1,2	1,1	24—56	Сердечники реле, экраны и т. д.
0,8	0,8	2,0	Сердечники катушек индуктивности и магнитные экраны
0,85	—	—	То же
0,73	1,6	3,2—5,6	Сердечники реле
0,3	1,2 ÷ 1,5	2,2	Корпуса приборов, магнитные экраны
0,475	1,23	960—1200	Корпуса электрических машин и аппаратов
0,5	1,39	1200—1430	То же

железо, порошкообразный пермаллой, альсифер, магнетит. Например, альсифер обладает начальной относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = 10000 \div 35000$, максимальной относительной магнитной проницаемостью $\mu_{r\max} = 110000$, магнитной индукцией насыщения $B_{\max} = 1,2 \div 1,5 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$.

В табл. 29 приведены основные характеристики некоторых наиболее употребительных магнитно-мягких материалов.

Помимо магнитодиэлектриков, широкое применение получили магнитно-мягкие материалы **ферриты**, представляющие собой соединения окислов железа с металлами — никелем, цинком и др. Ферриты благодаря относительно большому удельному сопротивлению являются полупроводниками. Потери в них на вихревые токи при высоких частотах относительно малы. Ферриты разработаны в Советском Союзе профессором Г. А. Займовским. Из основных марок ферритов, применяемых в Советском Союзе, можно отметить следующие: НЦ-40 (никелево-цинковый с начальной относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = 40$), НЦ-90, НЦ-200, НЦ-250, НЦ-500 и НЦ-1000. Феррит, называемый магнетитом, не содержит в себе никаких иных металлов, кроме железа, и состоит из закиси — окиси железа Fe_3O_4 .

2. Магнитно-твердые материалы. Отличительная особенность магнитно-твердых материалов — их небольшая магнитная проницаемость μ , высокая остаточная магнитная индукция B_r и большая задерживающая (коэрцитивная) сила H_c . Вследствие этого обычно из таких материалов изготавливаются постоянные магниты, применяемые в технике связи, электроизмерительной технике и т. п.

На практике существует большое разнообразие типов магнитно-твердых материалов. Из них наиболее употребительны вольфрамовые, хромовые и кобальтовые стали, обладающие относительно большими величинами задерживающей силы и остаточного магнетизма.

В последние годы советские ученые разработали ряд железо-никелево-алюминиевых сплавов, обладающих весьма высокими магнитными качествами. К ним относятся такие сплавы, как альни, альнис и альник. Профессор А. С. Займовский разработал магнитно-твердый материал под названием «магник», превосходящий по своим магнитным качествам вышеуказанные магнитно-твердые материалы.

Железо-никелево-алюминиевые сплавы — нековкие материалы, а поэтому магниты получаются из них путем отливки или спекания их.

К новым магнитно-твердым материалам, обладающим весьма высокими магнитными качествами, относятся сплавы платины с железом или кобальтом.

В табл. 30 приведены основные характеристики магнитно-твердых материалов.

Основные характеристики некоторых магнитно-твердых материалов

Наименование материала и процентное содержание его примесей	Задерживающая сила H_c	Остаточная магнитная индукция B_r
	$\frac{a}{\text{м}}$	
Вольфрамовая сталь ЭЕВА (0,7% С, 6% W)	4 800	1,0
Хромовая сталь ЭЕХЗА (1,0% С, 3% Cr)	4 800	0,9
Кобальтовая сталь ЭЕК5 (1,0% С, 5% Cr, 5% Co)	7 200	0,9
Кобальтовая сталь ЭЕК10 (1,0% С, 5% Cr, 1,5% W, 10% Co)	10 400	0,9
Кобальтовая сталь ЭЕК15 (1,0% С, 8% Cr, 5% W, 15% Co)	14 400	0,8
Кобальтовая сталь ЭЕК30 (1,0% С, 5% Cr, 5% W, 30% Co)	17 600	0,9
Альни ($4\frac{1}{2}\%$ Si, 25% Ni, 14% Al)	44 000	0,55
Альниси (1% Si, 34% Ni, 14% Al)	64 000	0,4
Альнико (0% Si, 12% Co, 17% Ni, 10% Al)	40 000	0,7
Магнико (3% Si, 24% Co, 13% Ni, 8% Al)	44 000	1,25
Платино-железный сплав (Pt 78%, Fe 22%)	90 000—120 000	0,4—0,6
Платино-кобальтовый сплав (Pt 76,7%, Co 23,3%)	150 000—240 000	0,3—0,5

Постоянные магниты, изготовленные из железо-никелево-алюминиевых, платино-кобальтового и платино-железного сплавов, обладают относительно большой энергией. Например, в одном кубическом сантиметре постоянного магнита, изготовленного из магнико, содержится магнитной энергии примерно в пятнадцать раз больше, чем в постоянном магните из вольфрамовой стали. Поэтому постоянные магниты из сплавов альнико, магнико и др., значительно меньше по габаритам, чем обычные постоянные магниты из вольфрамовой, кобальтовой стали и т. д., что исключительно важно при конструировании электромагнитных механизмов.

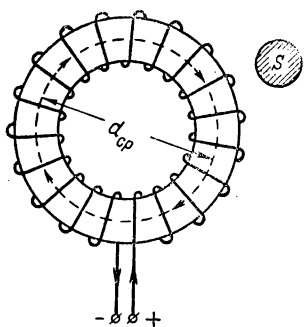
§ 79. ЗАКОНЫ ДЛЯ МАГНИТНЫХ ЦЕПЕЙ

Закон Ома для магнитной цепи. Магнитной цепью называется совокупность физических тел, по которым замыкается магнитный поток, создаваемый токами в этой цепи. Магнитная цепь в общем случае состоит из самых разнородных физических тел, например металлов (сталь, железо, медь, алюминий и др.), разного рода изоляционных прослоек, воздушных зазоров и т. д.

Магнитная цепь, в которой магнитный поток нигде не разветвляется, называется простой магнитной цепью. При наличии же

ответвлений магнитного потока магнитная цепь называется разветвленной.

Рассмотрим магнитный режим в простой магнитной цепи,



состоящей из стального круглого кольца, на который равномерно нанесена обмотка, состоящая из w витков проволоки (рис. 127). Площадь поперечного сечения стального сердечника заданной кольцевой катушки равна S , а средний диаметр кольца равен $d_{ср}$.

Если по обмотке данной катушки пропустить постоянный ток, то внутри стального сердечника катушки возникнет однородное магнитное поле, напряженность которого равна

$$H = \frac{wl}{l_{ср}},$$

где H — напряженность магнитного поля в амперах на метр;

I — ток, протекающий по обмотке катушки в амперах;

$l_{ср}$ — длина средней линии кольца в метрах (показана на рис. 127 пунктиром);

w — число витков обмотки катушки.

Магнитная индукция в сердечнике катушки равна

$$B = \mu H = \mu \frac{wl}{l_{ср}},$$

где B — магнитная индукция в вольт-секундах на квадратный метр;

μ — магнитная проницаемость сердечника катушки в генри на метр.

Так как внутри данного стального сердечника магнитное поле однородно, то величина магнитного потока, проходящего через любое поперечное сечение кольцевого сердечника, равна

$$\Phi = BS = \frac{\mu wl}{l_{ср}} S, \quad (122)$$

где Φ — магнитный поток в вольт-секундах;

S — площадь поперечного сечения стального сердечника в квадратных метрах.

Преобразуем формулу (122), придав ей следующий вид:

$$\Phi = \frac{wl}{\frac{l_{ср}}{\mu S}}. \quad (123)$$

Величина ωI , стоящая в числителе формулы, называется намагничивающей силой (магнитодвижущей силой) катушки

$$F = \omega I, \quad (124)$$

где F — намагничивающая сила катушки;
 ω — число витков обмотки катушки;
 I — ток, протекающий по обмотке катушки.

Из формулы (124) следует, что намагничивающая сила F катушки равна произведению числа витков ω катушки на величину тока I в этих витках.

Пользуясь формулой (124), определим размерность намагничивающей силы:

$$[F] = [\omega I] = \text{ампер},$$

т. е. размерность намагничивающей силы в системе единиц МКСА выражается в амперах.

В соответствии в этом за единицу измерения намагничивающей силы в системе единиц МКСА принят 1 ампер (1 а, 1 А).

Если в формуле (124) положить число витков $\omega = 1$ и ток $I = 1$ ампер, то получим

$$F = \omega I = 1 \cdot 1 = 1 \text{ а},$$

т. е. намагничивающая сила равна одному амперу, если через контур, состоящий из одного витка, протекает ток, равный одному амперу.

Пример 74. Определить намагничивающую силу катушки с током, если она имеет число витков $\omega = 200$, по которым протекает ток $I = 5$ а.

Решение. Применяя формулу (124), находим

$$F = \omega I = 200 \cdot 5 = 1000 \text{ а}.$$

Намагничивающая сила катушки с током равна произведению числа витков ω катушки на величину тока I в этих витках. Это произведение называется ампер-витками катушки. В соответствии с этим единицу измерения намагничивающей силы называют также 1 ампер-виток, так что

$$1 \text{ ампер-виток} = 1 \text{ ампер}.$$

Намагничивающая сила (ампер-витки) катушки является основной причиной создания магнитного потока в магнитных цепях.

Выражение $\frac{l_{\text{ср}}}{\mu S}$, стоящее в знаменателе формулы (123), называется магнитным сопротивлением магнитной цепи:

$$R_m = \frac{l_{\text{ср}}}{\mu S}, \quad (125)$$

где R_m — магнитное сопротивление магнитной цепи:

Пользуясь формулой (125), выясним размерность магнитного сопротивления в системе единиц МКСА:

$$[R_m] = \left[\frac{l_{cp}}{\mu S} \right] = \frac{\text{метр}}{\frac{\text{ом} \cdot \text{секунда}}{\text{метр}} \cdot \text{кв. метр}} = \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{сек}} = \frac{1}{\text{генри}},$$

т. е. размерность магнитного сопротивления в системе единиц МКСА выражается величиной, обратной генри.

Из формулы (125) следует, что магнитное сопротивление магнитной цепи прямо пропорционально длине l_{cp} магнитопровода, обратно пропорционально площади сечения S его и зависит от магнитной проницаемости μ материала сердечника катушки. Чем больше μ , тем меньше при всех прочих одинаковых условиях магнитное сопротивление катушки.

Теперь мы сможем записать формулу (123) в сокращенном виде:

$$\Phi = \frac{F}{R_m}. \quad (126)$$

Формула (126) является математическим выражением основного закона для магнитной цепи.

Основной закон для магнитной цепи формулируется следующим образом: **магнитный поток Φ в магнитной цепи прямо пропорционален намагничивающей силе F и обратно пропорционален магнитному сопротивлению R_m этой цепи.**

Нетрудно видеть, что основной закон для магнитной цепи аналогичен закону Ома для электрической цепи. Здесь аналогом намагничивающей силы F является электродвижущая сила E , аналогом магнитного сопротивления R_m — электрическое сопротивление R , а аналогом магнитной проницаемости μ — удельная проводимость γ проводника. В соответствии с этим формулу (126) называют по аналогии с формулой закона Ома для электрической цепи формулой закона Ома для магнитной цепи.

Второй закон Кирхгофа для магнитной цепи. Допустим, что на замкнутом стальном сердечнике (рис. 128) помещены три катушки с числами витков, равными соответственно ω_1 , ω_2 и ω_3 . Постоянный ток, протекающий по первой катушке, равен I_1 , по второй — I_2 и по третьей — I_3 . Направление токов в обмотках катушек отмечено стрелками, нанесенными на витках этих катушек. Сердечник состоит из четырех участков, соединенных последовательно друг с другом. Первый участок имеет длину l_1 и площадь поперечного сечения S_1 , второй участок — длину l_2 и площадь поперечного сечения S_2 и т. д.

По правилу правой руки первая и третья катушки создают магнитные поля одного направления (в направлении движения часовой стрелки), а вторая катушка создает встречное магнит-

ное поле (против движения часовой стрелки). Все три катушки совместно создают некоторое результирующее магнитное поле, средняя магнитная линия которого показана пунктиром. Направление ее здесь совпадает с направлением движения часовой стрелки.

Магнитный поток в рассматриваемой цепи можно определить, исходя из закона Ома для магнитной цепи, который в данном случае может быть сформулирован так: магнитный поток в последовательной магнитной цепи прямо

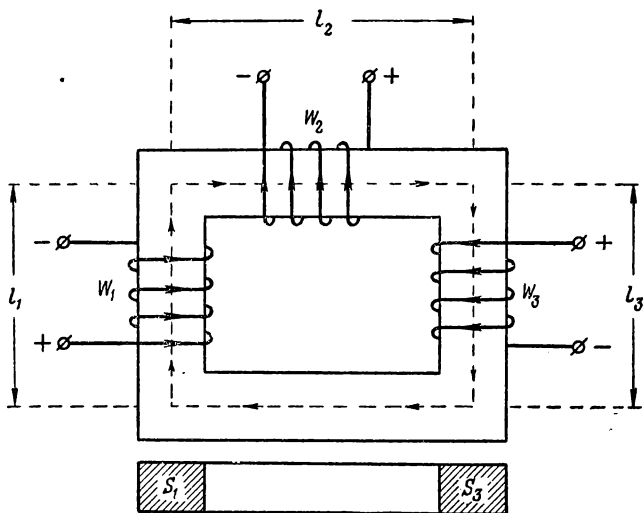


Рис. 128. Магнитная цепь

пропорционален алгебраической сумме намагничивающих сил (ампер-витков), действующих в цепи, и обратно пропорционален сумме магнитных сопротивлений всех ее участков:

$$\Phi = \frac{\Sigma wI}{\Sigma R_m}, \quad (127)$$

где Φ — магнитный поток;

ΣwI — алгебраическая сумма намагничивающих сил (ампер-витков);

ΣR_m — сумма магнитных сопротивлений отдельных участков последовательной магнитной цепи.

Представим формулу (127) в развернутом виде:

$$\Phi = \frac{w_1 I_1 - w_2 I_2 + w_3 I_3}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{l_3}{\mu_3 S_3} + \frac{l_4}{\mu_4 S_4}}, \quad (128)$$

где μ_1, μ_2, μ_3 и μ_4 — магнитные проницаемости соответственно первого, второго, третьего и четвертого участков магнитной цепи.

Из формулы (128) следует, что

$$\frac{\Phi l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{\Phi l_2}{\mu_2 S_2} + \frac{\Phi l_3}{\mu_3 S_3} + \frac{\Phi l_4}{\mu_4 S_4} = \omega_1 I_1 - \omega_2 I_2 + \omega_3 I_3,$$

или, иначе,

$$\frac{B_1 l_1}{\mu_1} + \frac{B_2 l_2}{\mu_2} + \frac{B_3 l_3}{\mu_3} + \frac{B_4 l_4}{\mu_4} = \omega_1 I_1 - \omega_2 I_2 + \omega_3 I_3,$$

так как

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1}; \quad B_2 = \frac{\Phi_2}{S_2} \text{ и т. д.}$$

Но, как известно,

$$\frac{B_1}{\mu_1} = H_1; \quad \frac{B_2}{\mu_2} = H_2 \text{ и т. д.,}$$

где H_1, H_2 и т. д. — напряженности магнитного поля соответственно на первом, втором, третьем и четвертом участках магнитной цепи.

Следовательно, равенству (128) можно придать такой вид:

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 = \omega_1 I_1 - \omega_2 I_2 + \omega_3 I_3. \quad (129)$$

Величины $H_1 l_1, H_2 l_2$ и т. д., входящие в левую часть последнего равенства, называются **магнитными напряжениями** и обозначаются соответственно символами U_{m1}, U_{m2} и т. д.

Выясним размерность магнитного напряжения:

$$[Hl] = \frac{\text{ампер}}{\text{метр}} \cdot \text{метр} = \text{ампер},$$

или, иначе,

$$[Hl] = \frac{\text{ампер-виток}}{\text{метр}} \cdot \text{метр} = \text{ампер-виток}.$$

В соответствии с этим за единицу измерения магнитного напряжения в системе единиц МКСА принят 1 ампер (1 ампер-виток).

Магнитное напряжение Hl — величина алгебраическая. Если при обходе по магнитной цепи будем перемещаться на данном участке ее в направлении магнитного потока, то магнитное напряжение на этом участке необходимо будет брать с положительным знаком. Наоборот, если при обходе по магнитной цепи будем перемещаться на данном участке навстречу магнитному потоку, то магнитное напряжение на этом участке будем брать с отрицательным знаком.

Теперь равенство (129) мы можем сформулировать так: алгебраическая сумма намагничивающих сил (ампер-витков) в данной магнитной цепи (магнитном контуре) равна алгебраической сумме магнитных напряжений (ампер-витков), расходуемых на всех участках этой цепи (магнитного контура).

Нетрудно видеть, что формула (129) аналогична формуле второго закона Кирхгофа для электрической цепи, где аналогом алгебраической суммы намагничивающих сил (ампер-витков) $\Sigma \omega I$ является алгебраическая сумма электродвижущих сил ΣE , а аналогом алгебраической суммы магнитных напряжений ΣHl (ампер-витков, расходуемых на участках цепи) — алгебраическая сумма падений напряжения ΣIr на отдельных участках электрической цепи. В соответствии с этим формулу (129) называют по аналогии с формулой второго закона Кирхгофа для электрической цепи формулой второго закона Кирхгофа для магнитной цепи.

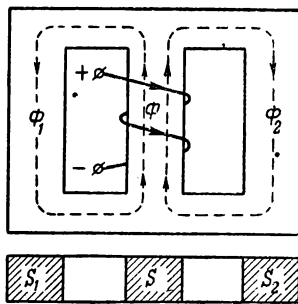


Рис. 129. Разветвленная магнитная цепь

Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи. Разветвленной магнитной цепью называется цепь, в которой магнитный поток распределяется по нескольким направлениям. На рис. 129 показана разветвленная магнитная цепь, где общий магнитный поток Φ , создаваемый намагничивающей силой катушки, распределяется по двум направлениям.

Так как магнитные линии замкнуты на себя, то общий магнитный поток, создаваемый намагничивающей силой катушки, равен сумме магнитных потоков, имеющих в параллельных ветвях:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2, \quad (130)$$

где Φ — общий магнитный поток в неразветвленном участке магнитной цепи;

Φ_1 и Φ_2 — магнитные потоки соответственно в первой и второй параллельных ветвях.

Нетрудно видеть, что формула (130) аналогична формуле первого закона Кирхгофа для разветвленной электрической цепи, где аналогом магнитного потока Φ является ток I . В соответствии с этим формулу (130) называют по аналогии с формулой первого закона Кирхгофа для электрической цепи формулой первого закона Кирхгофа для магнитной цепи.

Распределение магнитного потока в параллельных магнитных цепях. Магнитные напряжения на параллельных магнитных ветвях равны друг другу:

$$H_1 l_1 = H_2 l_2, \quad (131)$$

где H_1 и H_2 — напряженности магнитного поля соответственно в первой и второй параллельных ветвях;

l_1 и l_2 — средние длины соответственно первого и второго участков параллельных ветвей.

Но, как известно,

$$H_1 = \frac{\Phi_1}{\mu_1 S_1} \quad \text{и} \quad H_2 = \frac{\Phi_2}{\mu_2 S_2}.$$

Подставив эти выражения для H_1 и H_2 в равенство (131), получим

$$\Phi_1 \cdot \frac{l_1}{\mu_1 S_1} = \Phi_2 \cdot \frac{l_2}{\mu_2 S_2},$$

или, иначе,

$$\Phi_1 R_{m1} = \Phi_2 R_{m2}, \quad (132)$$

где Φ_1 и Φ_2 — магнитные потоки соответственно первой и второй параллельных ветвей;

R_{m1} и R_{m2} — магнитные сопротивления соответственно первой и второй параллельных ветвей.

Из равенства (132) получаем:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{R_{m2}}{R_{m1}}, \quad (133)$$

т. е. магнитный поток распределяется в параллельных ветвях обратно пропорционально магнитным сопротивлениям этих ветвей.

§ 80. РАСЧЕТ ПРОСТОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ.

Рассчитать магнитную цепь — это значит по заданному магнитному потоку (магнитной индукции), кривым намагничивания и размерам магнитной цепи определить намагничивающую силу (общее число ампер-витков), необходимую для создания заданного режима в магнитной цепи.

Допустим, что задана простая магнитная цепь, состоящая из пяти последовательно соединенных участков цепи, размеры которых (длины l_1, l_2, l_3, l_4 и l_0 , а также площади поперечных сечений S_1, S_2, S_3, S_4 и S_0) показаны на рис. 130. Материалом первых четырех

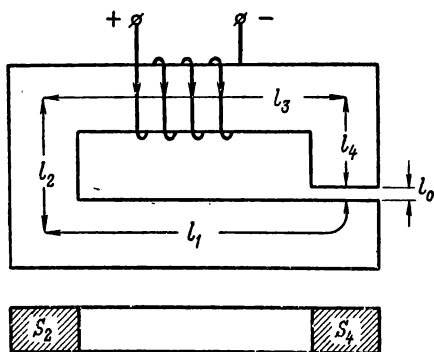


Рис. 130. Простая магнитная цепь с воздушным зазором

участков цепи является электротехническая сталь, кривая намагничивания которой известна (рис. 131). Пятым участком магнитной цепи служит воздушный зазор, имеющий толщину l_0 и площадь поперечного сечения S_0 . Требуется определить, какую намагничивающую силу, или, иначе, какое число ампер-витков должна иметь катушка с током, положенная на один из участков цепи, чтобы получить в этой цепи магнитный поток Φ .

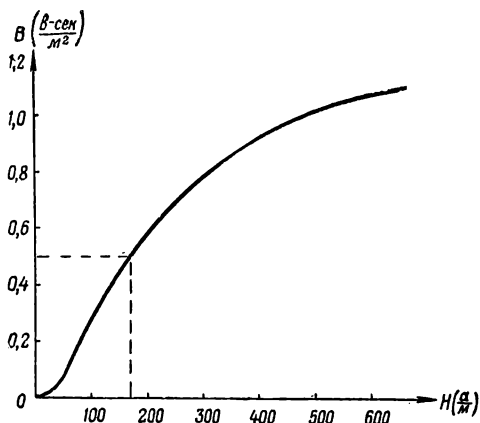


Рис. 131. Кривая намагничивания электротехнической стали

Порядок расчета заданной магнитной цепи сводится к следующему:

1. По заданному магнитному потоку Φ и поперечным сечениям S_1, S_2, S_3, S_4 и S_0 отдельных участков цепи определяют для этих участков величины магнитных индукций по формулам

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1}; \quad B_2 = \frac{\Phi_2}{S_2}; \quad B_3 = \frac{\Phi_3}{S_3}; \quad B_4 = \frac{\Phi_4}{S_4} \quad \text{и} \quad B_0 = \frac{\Phi}{S_0}.$$

2. Пользуясь кривой намагничивания электротехнической стали (рис. 131), находят напряженности магнитного поля H_1, H_2, H_3 и H_4 по соответствующим им величинам магнитной индукции B_1, B_2, B_3 и B_4 .

3. Напряженность магнитного поля в воздухе H_0 определяют по формуле

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0}{4\pi} = \frac{10^7}{4\pi} B_0 \cong 8 \cdot 10^5 B_0.$$

4. Определив напряженности магнитного поля во всех участках магнитной цепи, находят магнитные напряжения (ампер-витки), расходуемые на отдельных участках цепи:

$$H_1 l_1; \quad H_2 l_2; \quad H_3 l_3; \quad H_4 l_4 \quad \text{и} \quad H_0 l_0.$$

5. Затем определяют намагничивающую силу F (полные ампер-витки) по формуле

$$F = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 + H_0 l_0.$$

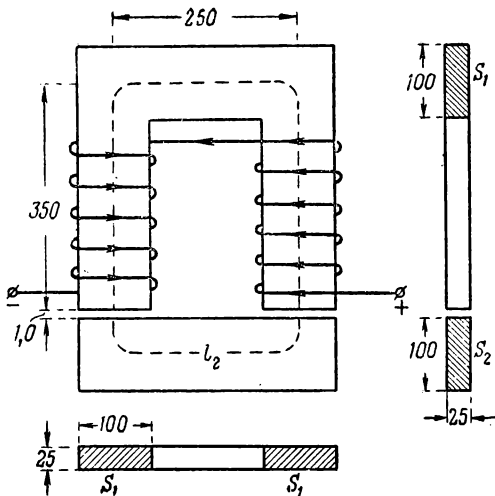


Рис. 132. Простая магнитная цепь с воздушными зазорами

топровода П-образной формы выполнена из электротехнической стали марки Э11, нижняя часть — из чугуна. Кривые намагничивания этих материалов приведены на рис. 131 и 133. Верхняя часть магнитопровода отделена от нижней двумя воздушными зазорами, имеющими одну и ту же толщину l_0 и одинаковые поперечные сечения, равные поперечному сечению стального сердечника верхней части магнитопровода. Размеры магнитопровода на рис. 132 указаны в миллиметрах. На каждый из вертикальных стержней верхней части магнитопровода надета катушка. Катушки одинаковы как по количеству витков, так и по сопротивлению их обмоток. Соединены они друг с другом последовательно, так что через их обмотки протекает один и тот же ток. Требуется определить, какое число витков должна иметь каждая из катушек, если эти катушки создают в магнитопроводе магнитные поля одинакового направления, а ток, протекающий через их обмотки, $I = 0,5$ а.

Решение. 1) Определяем длины участков средней магнитной линии (пунктирная линия на рис. 132) магнитопровода.

а) Длина верхней части магнитопровода равна

$$l_1 = 300 + 250 + 300 = 850 \text{ мм} = 0,85 \text{ м.}$$

б) Длина нижней части магнитопровода равна

$$l_2 = 250 \text{ мм} = 0,25 \text{ м.}$$

в) Толщина двух воздушных зазоров равна

$$2l_0 = 2 \cdot 0,5 = 1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м.}$$

2) Вычисляем площади поперечных сечений отдельных участков магнитопровода, которые в данном случае все равны друг другу:

$$S_1 = S_2 = S_0 = S = 25 \cdot 100 = 2500 \text{ мм}^2 = 0,0025 \text{ м}^2.$$

6. Но намагничивающая сила F , как известно, равна произведению числа витков ω катушки на величину тока I в них, т. е.

$$F = \omega I.$$

Следовательно, задаваясь током I , можно определить необходимое число витков катушки

$$\omega = \frac{F}{I}.$$

Пример 75. В воздушных зазорах магнитной цепи (рис. 132) необходимо создать магнитный поток $\Phi = 0,00125$ в-сек. Верхняя часть сердечника магнитопровода

3) Находим величины магнитной индукции магнитного поля во всех участках магнитопровода; в данном случае они всюду одинаковы из-за одинаковых значений магнитного потока Φ и площадей поперечных сечений:

$$B_1 = B_2 = B_0 = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,00125}{0,0025} = 0,5 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}.$$

4) Пользуясь кривыми намагничивания (рис. 131 и 133), выясняем, какая величина напряженности магнитного поля должна быть в сердечнике магнитопровода.

а) В верхней части магнитопровода (в электротехнической стали марки Э11) магнитной индукции $B_1 = 0,5 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$ соответствует напряженность магнитного поля $H_1 = 175 \frac{\text{а}}{\text{м}}$.

б) В нижней части магнитопровода (в чугуна) магнитной индукции $B = 0,5 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$ соответствует напряженность магнитного поля $H_2 = 2200 \frac{\text{а}}{\text{м}}$.

в) В воздушных зазорах напряженность магнитного поля

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0,5}{4\pi} = 4 \cdot 10^5 \frac{\text{а}}{\text{м}}.$$

5) Определяем магнитные напряжения (ампер-витки), расходуемые на отдельных участках магнитной цепи.

а) В верхней части магнитопровода

$$H_1 l_1 = 175 \cdot 0,85 \cong 150 \text{ ампер (ампер-витков)}.$$

б) В нижней части магнитопровода

$$H_2 l_2 = 0,25 \cdot 2200 = 550 \text{ ампер (ампер-витков)}$$

в) В воздушных зазорах

$$H_0 \cdot 2l_0 = 400\,000 \cdot 0,001 = 400 \text{ ампер (ампер-витков)}.$$

6) Находим намагничивающую силу (полное число ампер-витков) в магнитной цепи:

$$F = H_1 l_1 + H_2 l_2 + 2H_0 l_0 = 150 + 550 + 400 = 1100 \text{ ампер (ампер-витков)}.$$

7) Определяем число витков двух катушек вместе взятых:

$$\omega = \frac{F}{I} = \frac{1100}{0,5} = 2200 \text{ витков}.$$

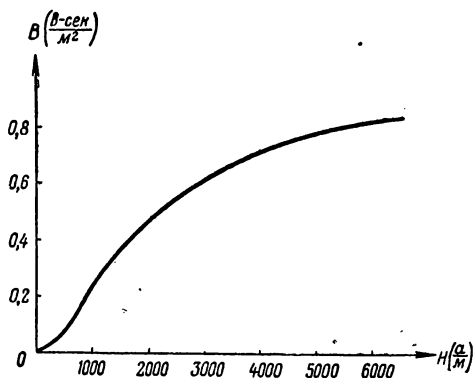


Рис. 133. Кривая намагничивания чугуна

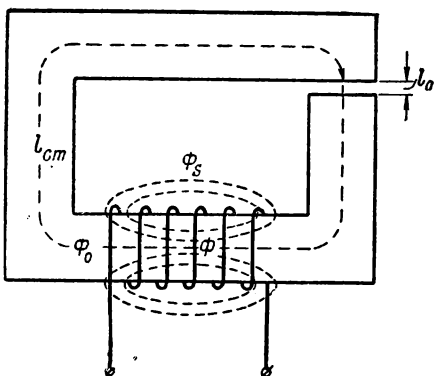


Рис. 134. Магнитная цепь с магнитным рассеянием

Число витков каждой катушки равно

$$\omega_1 = \omega_2 = \frac{\omega}{2} = \frac{2200}{2} = 1100 \text{ витков.}$$

Примечание. Если бы в данной магнитной цепи происходило магнитное рассеяние, т. е. часть магнитного потока, создаваемого катушками с током, замыкалась бы через воздух, а не через магнитную цепь, то необходимо было бы учесть эту утечку магнитного потока с помощью коэффициента рассеяния, который обычно определяется экспериментальным путем. Для магнитных цепей, составленных только

из ферромагнитных материалов и имеющих малые воздушные зазоры, коэффициент рассеяния принимается равным единице.

Пример 76. В воздушном зазоре магнитной цепи, изображенной на рис. 134, необходимо создать магнитную индукцию $B_0 = 0,4 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$. Определить, какой ток должен протекать по виткам катушки, если число витков катушки $\omega = 1000$. Материал магнитопровода — электротехническая сталь марки Э11, для которой кривая намагничивания приведена на рис. 131. Длина воздушного зазора $l_0 = 0,002 \text{ м}$, средняя длина магнитной линии в стали равна $l_{\text{ст}} = 1,2 \text{ м}$, площади поперечного сечения стали и воздушного зазора одинаковы и равны $S = 0,0025 \text{ м}^2$. Коэффициент магнитного рассеяния $K = 1,25$.

Решение. Определяем полезный магнитный поток Φ_0 , т. е. тот поток, который проходит через воздушный зазор:

$$\Phi_0 = B_0 S = 0,4 \cdot 0,0025 = 0,001 \text{ в-сек.}$$

Определяем полный магнитный поток, создаваемый заданной катушкой:

$$\Phi = K \Phi_0 = 1,25 \cdot 0,001 = 0,00125 \text{ в-сек.}$$

Находим магнитную индукцию в стали:

$$B_{\text{ст}} = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,00125}{0,0025} = 0,5 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}.$$

По кривой намагничивания (рис. 131) для магнитной индукции $B_{\text{ст}} = 0,5 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$ находим напряженность магнитного поля, которая в данном случае равна $H_{\text{ст}} = 175 \frac{\text{а}}{\text{м}}$.

Находим ампер-витки, расходуемые в стали:

$$H_{\text{ст}} l_{\text{ст}} = 175 \cdot 1,2 = 210 \text{ а (ампер-витков).}$$

Теперь определяем напряженность магнитного поля в воздушном зазоре:

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0,4}{\frac{4\pi}{10^7}} = \frac{10^6}{\pi} \frac{\text{а}}{\text{м}}.$$

Находим ампер-витки, расходуемые в воздухе:

$$H_0 l_0 = \frac{10^8}{\pi} \cdot 0,002 = 635 \text{ (ампер-витков).}$$

Намагничивающая сила катушки равна

$$F = \omega I = H_{ст} l_{ст} + H_0 l_0 = 210 + 635 = 845 \text{ (ампер-витков).}$$

Ток в катушке должен быть установлен следующей величины:

$$I = \frac{F}{\omega} = \frac{845}{1000} = 0,845 \text{ а.}$$

Из рассмотренного примера видно, что число ампер-витков, израсходованных в воздушном зазоре, больше, чем в стали, примерно в три раза, в то время как длина воздушного зазора меньше длины средней магнитной линии в стали в 600 раз. Это объясняется тем, что магнитная проницаемость воздуха значительно меньше магнитной проницаемости стали.

§ 81. РАСЧЕТ РАЗВЕТВЛЕННОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчитать разветвленную магнитную цепь — это значит по заданному магнитному потоку (магнитной индукции) в каком-либо участке разветвлений магнитной цепи, по размерам участков магнитной цепи и по кривым намагничивания рассчитать число ампер-витков (намагничивающую силу), необходимое для получения заданного магнитного режима.

В основу расчета разветвленной магнитной цепи положены первый и второй законы Кирхгофа для магнитной цепи.

Покажем порядок расчета разветвленной магнитной цепи на примере.

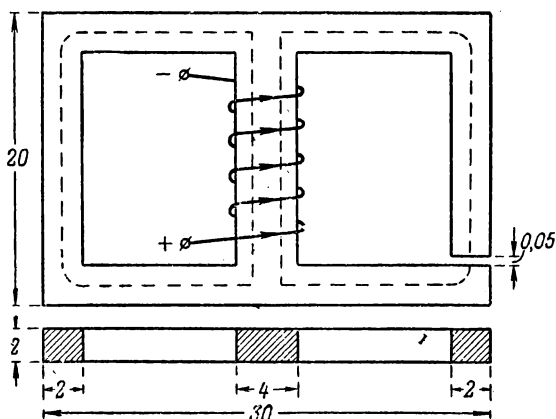


Рис. 135. Разветвленная магнитная цепь

Пример 77. Допустим, что задана разветвленная магнитная цепь (рис. 135). На среднем стержне ее посажена катушка, создающая намагничивающую силу (ампер-витки) в этой цепи. В правом стержне цепи имеется воздушный зазор, в котором необходимо создать магнитный поток Φ_1 . Размеры магнитопровода на рис. 135 указаны в сантиметрах. Материалом магнитной цепи является электротехническая сталь, кривая намагничивания которой показана на рис. 131. Магнитным рассеянием можно пренебречь.

Решение. 1) Определяем средние длины участков магнитной цепи:

а) для правого стержня

$$l_1 = 2 \cdot 15 + 20 - 4 - 0,05 = 45,95 \text{ см} \approx 0,46 \text{ м};$$

б) для левого стержня

$$l_2 = 2 \cdot 15 + 20 - 4 = 46 \text{ см} = 0,46 \text{ м};$$

в) для среднего стержня

$$l_3 = 20 - 2 = 18 \text{ см} = 0,18 \text{ м};$$

г) для воздушного зазора

$$l_0 = 0,05 \text{ см} = 0,0005 \text{ м}.$$

2) Определяем площади поперечных сечений отдельных участков магнитной цепи:

а) для правого стержня

$$S_1 = 2 \cdot 2 = 4 \text{ см}^2 = 0,0004 \text{ м}^2;$$

б) для левого стержня

$$S_2 = 2 \cdot 2 = 4 \text{ см}^2 = 0,0004 \text{ м}^2;$$

в) для среднего стержня

$$S_3 = 4 \cdot 2 = 8 \text{ см}^2 = 0,0008 \text{ м}^2;$$

г) для воздушного зазора

$$S_0 = 2 \cdot 2 = 4 \text{ см}^2 = 0,0004 \text{ м}^2.$$

3) Находим магнитную индукцию в правом стержне:

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = \frac{2 \cdot 10^4}{4 \cdot 10^{-4}} = 0,5 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}.$$

4) Пользуясь кривой намагничивания (рис. 131), находим для $B_1 = 0,5 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$ соответствующую ей напряженность магнитного поля $H_1 = 175 \frac{\text{а}}{\text{м}}$.

5) Далее определяем магнитное напряжение в правом стержне:

$$H_1 l_1 = 175 \cdot 0,46 = 80 \text{ а (ампер-витков)}.$$

6) Магнитная индукция в воздушном зазоре такая же, как и в правом стержне, т. е.

$$B_0 = B_1 = 0,5 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2},$$

а поэтому напряженность магнитного поля в воздушном зазоре будет равна

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0,5}{\frac{4\pi}{10^7}} = 4 \cdot 10^5 \frac{a}{м}.$$

7) Далее определяем магнитное напряжение в воздушном зазоре:

$$H_0 l_0 = 4 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 200 \text{ а (ампер-витков)}.$$

8) Для определения напряженности магнитного поля в левом стержне составим уравнение применительно ко второму закону Кирхгофа для внешнего контура, обходя его по часовой стрелке:

$$H_1 l_1 + H_0 l_0 - H_2 l_2 = 0,$$

откуда находим, что

$$H_2 = \frac{H_1 l_1 + H_0 l_0}{l_2} = \frac{80 + 200}{0,46} = 610 \frac{a}{м}.$$

9) По кривой намагничивания (см. рис. 131) находим, что напряженности магнитного поля $H_2 = 610 \frac{a}{м}$ соответствует магнитная индукция $B_2 = 1,1 \frac{в-сек}{м^2}$.

10) Теперь находим магнитный поток в левом стержне:

$$\Phi_2 = B_2 S_2 = 1,1 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ в-сек}.$$

11) Магнитный поток в среднем стержне найдем, применив формулу первого закона Кирхгофа для магнитной цепи:

$$\Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2 = 2 \cdot 10^{-4} + 4,4 \cdot 10^{-4} = 6,4 \cdot 10^{-4} \text{ в-сек}.$$

12) Далее находим магнитную индукцию в среднем стержне:

$$B_3 = \frac{\Phi_3}{S_3} = \frac{6,4 \cdot 10^{-4}}{8 \cdot 10^{-4}} = 0,8 \frac{в-сек}{м^2}.$$

13) По кривой намагничивания (рис. 131) находим, что магнитной индукции $B_3 = 0,8 \frac{в-сек}{м^2}$ соответствует напряженность магнитного поля

$$H_3 = 320 \frac{a}{м}.$$

14) Магнитное напряжение на среднем стержне равно

$$H_3 l_3 = 320 \cdot 0,18 \approx 58 \text{ а (ампер-витков)}.$$

15) Находим намагничивающую силу (полное число ампер-витков) магнитной цепи, составив уравнение для правого контура в соответствии со вторым законом Кирхгофа:

$$F = H_1 l_1 + H_0 l_0 + H_3 l_3 = 80 + 200 + 58 = 338 \text{ а (ампер-витков)}.$$

16) Теперь можно определить число витков катушки:

$$\omega = \frac{F}{I} = \frac{338}{0,5} = 676 \text{ витков}.$$

Примечание. Если бы мы определяли намагничивающую силу, исходя из уравнения второго закона Кирхгофа, составленного для левого контура, то получили бы такую же величину намагничивающей силы:

$$F = H_2 l_2 + H_3 l_3 = 610 \cdot 0,46 + 320 \cdot 0,18 = 338 \text{ а}$$

и соответственно то же число витков катушки.

§ 82. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

Если внутрь катушки с током ввести стальной сердечник, то последний намагнитится и создаст свое собственное магнитное поле, которое, накладываясь на поле катушки, создаст некоторое результирующее магнитное поле. Так как магнитная проницае-

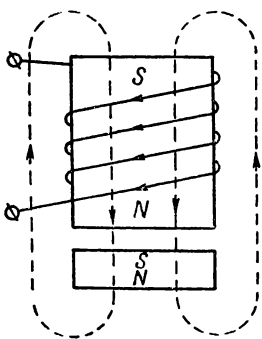


Рис. 136. Электромагнит стержневой формы

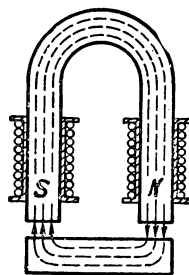


Рис. 137. Подковообразный электромагнит

мость стали по сравнению с магнитной проницаемостью воздуха очень велика, то и магнитная индукция в стали будет значительно больше, чем в воздухе.

Катушки со стальными сердечниками, называемые **электромагнитами**, обычно обладают более мощными магнитными полями, чем катушки без стали.

На рис. 136 показан электромагнит стержневой формы с цилиндрическим стальным сердечником, на который нанесена обмотка, состоящая из w витков проволоки.

Если через обмотку электромагнита пропустить ток, то в катушке возникнет магнитное поле, которое намагнитит стальной сердечник, создав в нем некоторую магнитную индукцию. Полярность электромагнита определяется правилом правой руки или правилом буравчика, применяемым для катушки.

Приблизим к торцевой поверхности сердечника электромагнита плоский кусок стали (якорь) так, чтобы плоский торец сердечника и плоскость якоря расположились параллельно друг

другу. Линии магнитной индукции из северного полюса торца сердечника будут проникать в тело якоря; пройдя его, они возвратятся к южному полюсу сердечника и через последний замкнутся на себя. Под влиянием магнитного поля электромагнита якорь намагнитится так, что на его плоскости, обращенной к северному полюсу электромагнита, возникнет южный магнитный полюс. Разноименные магнитные полюсы сердечника и якоря будут взаимодействовать, стремясь притянуться друг к другу.

Сила, с которой электромагнит притягивает якорь, называется подъемной силой его.

Подъемная сила электромагнита стержневой формы определяется формулой

$$F = \frac{B^2 S}{8\pi} \cdot 10^7, \quad (134)$$

где F — подъемная сила электромагнита в ньютонах;

B — магнитная индукция между плоскостями сердечника электромагнита и якоря в вольт-секундах на квадратный метр;

S — площадь торца сердечника в квадратных метрах;

$\pi = 3,14$.

Пример 78. Магнитная индукция в воздушном зазоре между сердечником электромагнита и якорем $B = 0,5$ в-сек/м², а площадь торца сердечника $S = 25,12$ см². Определить подъемную силу электромагнита.

Решение. По формуле (134) находим

$$F = \frac{B^2 S}{8\pi} \cdot 10^7 = \frac{0,5^2 \cdot 25,12 \cdot 10^{-4}}{8 \cdot 3,14} \cdot 10^7 = 250 \text{ ньютонов.}$$

Для подковообразного электромагнита (рис. 137), который одновременно притягивает якорь двумя полюсами, подъемная сила увеличивается в два раза по сравнению со стержнеобразным электромагнитом, т. е.

$$F = \frac{B^2}{4\pi} S \cdot 10^7. \quad (135)$$

Электромагниты нашли широкое применение в приборах, аппаратах и разного рода электромагнитных механизмах. Рассмотрим в качестве примера применение электромагнита в электрическом звонке постоянного тока.

Электрический звонок постоянного тока (рис. 138) состоит из подковообразного электромагнита 1, перед полюсами которого расположен укрепленный на пружине якорь 2 электромагнита, снабженный на свободном конце ударником 3. Пружина 4 прижимается к неподвижно укрепленному винту 5.

При прохождении тока по обмотке электромагнита последний притягивает к себе якорь и этим разрывает цепь между пружиной 4 и контактными винтом 5. После разрыва цепи ток в элек-

ромагните исчезает, и электромагнит теряет свои магнитные свойства. Вследствие этого якорь силой пружины отрывается от сердечника электромагнита и возвращается в исходное положение. Но как только пружина 4 прикоснется к контактному винту 5, цепь вновь замкнется, возникнет электрический ток в обмотке электромагнита и последний, намагнитившись, притянет якорь,

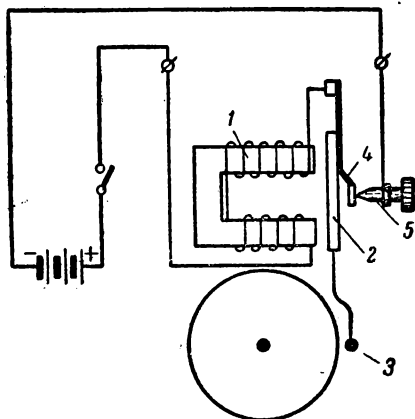


Рис. 138. Электрический звонок постоянного тока:

1 — подковообразный электромагнит; 2 — якорь;
3 — ударник; 4 — пружина; 5 — винт

разрывая цепь, и т. д. Таким образом, якорь электромагнита будет совершать колебательные движения некоторой определенной частоты между контактным винтом и сердечником электромагнита. Ударник 3, перемещаясь вместе с якорем, бьет по чашке звонка, заставляя его издавать звук.

**МЕХАНИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА ПРОВОДНИКИ С ТОКАМИ**

**§ 83. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
НА ПРЯМОЛИНЕЙНЫЙ ПРОВОДНИК С ТОКОМ**

Магнитное поле действует с определенной силой на любой перемещающийся в нем электрический заряд. Если, например, электрон, перемещающийся в пространстве, попадает в магнитное поле, то он испытывает на себе действие силы магнитного поля, стремящейся изменить траекторию его движения. На рис. 139 изображена картина искажения траектории движущегося электрона в однородном магнитном поле, магнитные линии которого направлены из-за плоскости чертежа к нам (точки на чертеже — следы пересечения магнитных линий с плоскостью чертежа).

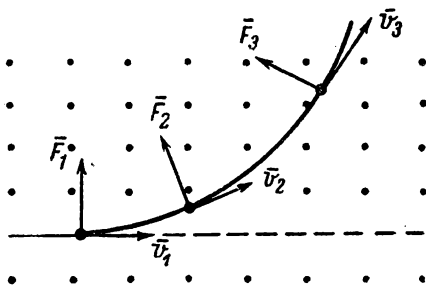


Рис. 139. Картина искажения прямолинейного движения электрона в магнитном поле

Чем больше скорость v_0 движения электрона и чем больше магнитная индукция B магнитного поля, тем больше сила F , действующая на движущийся электрон.

В отличие от электростатического поля в магнитном поле сила, действующая на движущийся электрон, направлена не по касательной к силовой линии, а перпендикулярно ей.

Если в металлическом проводнике отсутствует электрический ток, то все свободные электроны его движутся в межуатомном пространстве беспорядочно. При внесении этого проводника во внешнее магнитное поле на каждый движущийся электрон

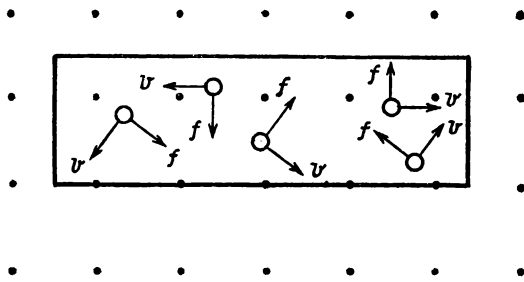


Рис. 140. На каждый из движущихся электронов действует сила, направленная перпендикулярно его движению и магнитным линиям

будет действовать сила f , направленная перпендикулярно направлению его движения и магнитным линиям (рис. 140). Но так как свободных электронов в проводнике имеется громадное число и все они движутся беспорядочно, то результирующая сила, действующая на них в магнитном поле, в любой момент времени равна нулю.

Совсем иная картина будет наблюдаться, если в магнитное поле поместить металлический проводник с током (рис. 141). В этом случае свободные электроны движутся общим потоком вдоль проводника направленно, упорядоченно, с некоторой равномерной скоростью v . Силы f , действующие на электроны, будут направлены в одну сторону, и результирующая сила F будет равна их геометрической сумме. Под влиянием этой результирующей силы F проводник с током будет перемещаться, если она сможет преодолеть сопротивление движению проводника. Исследуем величину этой силы для случая, когда прямолинейный проводник с током помещен в однородное магнитное поле.

Пусть прямолинейный проводник с током I (рис. 142) помещен в однородном магнитном поле. Проводник направлен от нас

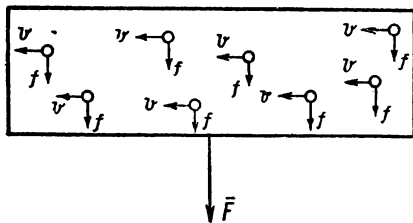


Рис. 141. Проводник с током в магнитном поле испытывает на себе действие механической силы F

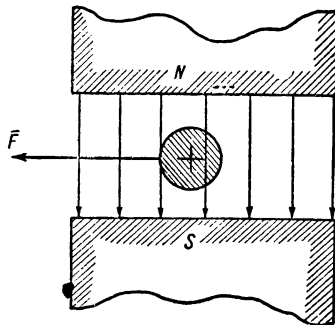


Рис. 142. Прямолинейный проводник с током в магнитном поле

за плоскость чертежа и перпендикулярно ей. Магнитные линии однородного магнитного поля направлены сверху вниз. Механическая сила F , действующая на проводник с током, будет направлена перпендикулярно направлению тока I и линиям магнитной индукции B , т. е. в данном случае влево.

Для определения направления механической силы, действующей на помещенный в магнитном поле проводник с током, применяется правило левой руки: если ладонь левой руки поместить в магнитное поле так, чтобы она была направлена навстречу линиям магнитной индукции и четыре вытянутых пальца ее указывали направление тока в проводнике, то отставленный большой палец покажет направление действия механической силы на проводник с током (рис. 143).

Направление механической силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, можно объяснить и с точки зрения условных свойств линий магнитной индукции, а именно способности их сокращаться по длине, взаимно отталкиваться друг от друга при одинаковых направлениях и взаимно притягиваться при разных направлениях. Проводник с током, внесенный в магнитное поле, сам создает свое собственное магнитное поле, направление которого определяется правилом буравчика, а поэтому линии магнитной индукции внешнего поля и поля тока имеют одинаковое направление справа от проводника и различное — слева от него. Следовательно, справа от проводника будем наблюдать сгущение линий магнитной индукции, а слева — разрежение (рис. 144). Линии магнитной индукции, стремясь сократиться по длине и взаимно оттолкнуться одна от другой, будут выталкивать проводник влево, т. е. в ту сторону, где результирующее магнитное поле слабее.

Если в однородное магнитное поле внесен прямолинейный проводник с током I , расположенный перпендикулярно магнитным линиям, то величина механической силы, действующей на этот проводник, определяется формулой

$$F = BIl, \quad (136)$$

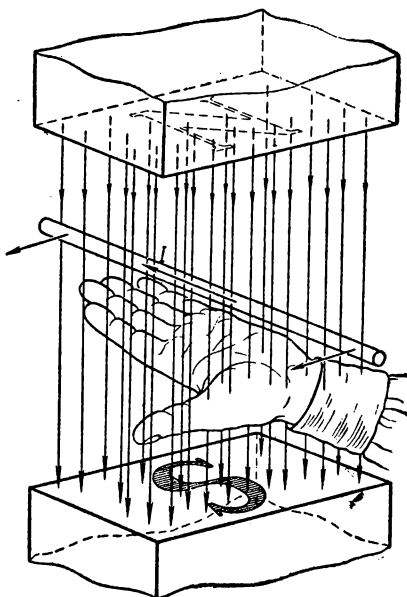


Рис. 143. Рисунок, поясняющий правило левой руки

где B — магнитная индукция в вольт-секундах на квадратный метр;

F — механическая сила в ньютонах;

I — ток в амперах;

l — активная длина провода с током в метрах.

Под активной длиной провода с током надо понимать ту часть проводника, которая непосредственно находится в магнитном поле.

Пример 79. В однородное магнитное поле, в котором магнитная индукция $B = 1 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$, помещен прямолинейный проводник с током $I = 8 \text{ а}$, расположенный под углом к магнитным линиям. Определить механическую силу F , действующую на этот проводник в поле, если активная длина его $l = 1,2 \text{ м}$.

Решение. По формуле (136) находим

$$F = BI = 1 \cdot 8 \cdot 1,2 = 9,6 \text{ ньютона.}$$

Если прямолинейный проводник расположен в однородном магнитном поле под углом α к магнитным линиям

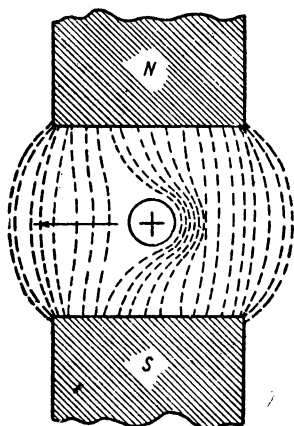


Рис. 144. Проводник с током стремится перемещаться в ту сторону, где результирующее поле слабее

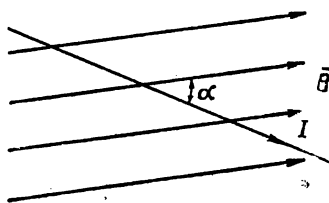


Рис. 145. Прямолинейный проводник с током, расположенный под углом α к направлению магнитных линий

(рис. 145), то механическая сила, действующая на этот проводник, определяется формулой

$$F = BI \cdot \sin \alpha. \quad (137)$$

Пример 80. Прямолинейный проводник с током $I = 12 \text{ а}$ и активной длиной $l = 0,8 \text{ м}$ помещен в однородное магнитное поле так, что его направление составляет с направлением магнитных линий поля угол $\alpha = 30^\circ$. Определить магнитную индукцию магнитного поля, если этот проводник испытывает на себе действие силы $F = 2,4 \text{ ньютона}$.

Решение. По формуле (137) находим

$$B = \frac{F}{I \cdot \sin \alpha} = \frac{2,4}{12 \cdot 0,8 \cdot 0,5} = 0,5 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}.$$

§ 84. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КОНТУР С ТОКОМ

Пусть во внешнее однородное магнитное поле внесен плоский, прямоугольной формы, контур с током, у которого две параллельные стороны расположены вдоль магнитных линий, а две другие — перпендикулярно им (рис. 146).

Применяя формулу (137)

$$F = BIl \cdot \sin \alpha$$

к каждой стороне контура в отдельности, найдем:

1) на сторону ab действует сила

$$F_1 = BIl_1 \cdot \sin 90^\circ = BIl_1;$$

2) на сторону bc действует сила

$$F_3 = BIl_2 \cdot \sin 0^\circ = 0;$$

3) на сторону cd действует сила

$$F_2 = BIl_1 \cdot \sin 90^\circ = BIl_1;$$

4) на сторону da действует сила

$$F_4 = BIl_2 \cdot \sin 0^\circ = 0.$$

Согласно правилу левой руки сила F_1 направлена влево от плоскости контура и перпендикулярно ей. Наоборот, сила F_2 направлена вправо от плоскости контура и перпендикулярно ей. Обе силы, равные по абсолютной величине, но противоположно направленные, стремятся повернуть контур вокруг его оси. Такая система двух сил является парой сил. Вращающий момент ее равен произведению одной из сил на расстояние (плечо) между точками приложения этих сил:

$$M = F_1 l_2, \quad (138)$$

где F_1 — сила в ньютонах;

l_2 — плечо пары сил в метрах.

Но

$$F_1 = BIl_1,$$

поэтому

$$M = BIl_1 l_2.$$

Так как

$$l_1 l_2 = S,$$

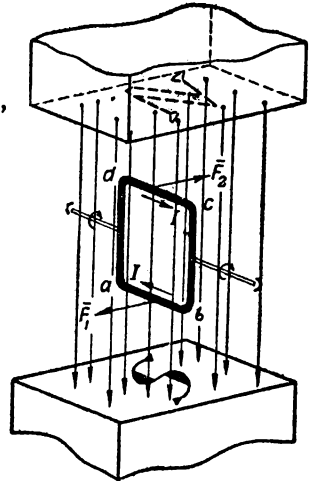


Рис. 146. Контур с током во внешнем магнитном поле

то

$$M = BIS, \quad (139)$$

где B — магнитная индукция внешнего поля в вольт-секундах на квадратный метр;

S — площадь контура в квадратных метрах;

I — ток в амперах;

M — вращающий момент в ньютонметрах.

Пример 81. Определить вращающий момент для рамки, имеющей площадь $S = 40 \text{ см}^2$, в обмотке которой протекает ток $I = 12 \text{ а}$, если она помещена в однородное магнитное поле $B = 0,2 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$ и расположена так, что плоскость ее совпадает с направлением магнитных линий поля.

Решение. По формуле (139) находим

$$M = BIS = 0,2 \cdot 12 \cdot 0,004 = 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ ньютонметров.}$$

Если плоскость контура с током не совпадает с направлением магнитных линий (рис. 147), то величина вращающего момента, действующего на него, определится формулой

$$M = BIS \cdot \sin \alpha, \quad (140)$$

где α — угол, составленный нормалью n (перпендикуляром к плоскости контура) с направлением магнитных линий.

Если вместо контура взять плоскую катушку, имеющую ω витков, то вращающий момент для катушки будет в ω раз больше, чем для одного витка:

$$M = BIS\omega \cdot \sin \alpha. \quad (141)$$

Рис. 147. Плоскость контура с током не совпадает с направлением магнитных линий

Необходимо отметить, что катушка с током всегда стремится установиться во внешнем магнитном поле так, чтобы ее пронизывал максимальный магнитный поток и направление ее собственного магнитного поля и поля внешнего совпали внутри катушки.

Свойство рамки с током взаимодействовать с внешним магнитным полем широко используется в электротехнике, в частности в электродвигателях, в магнитоэлектрических измерительных приборах и т. д.

§ 85. МЕХАНИЧЕСКАЯ СИЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОВОДНИКОВ С ТОКАМИ

Проводники с токами, расположенные близко один к другому, взаимно притягиваются или отталкиваются. Направление силы их взаимодействия зависит от пространственного расположения этих проводников и от направления токов в них.

Пусть два прямолинейных проводника, по которым протекают токи I_1 и I_2 , расположены параллельно один другому и так, что эти токи имеют различные направления (рис. 148).

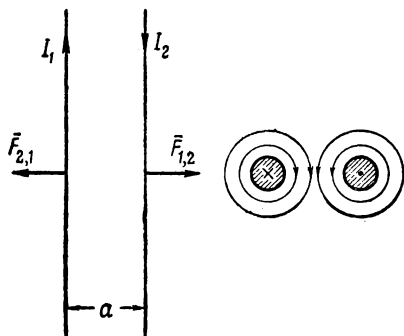


Рис. 148. Проводники с токами различных направлений отталкиваются друг от друга

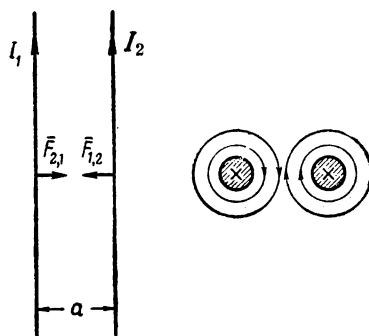


Рис. 149. Проводники с токами одинаковых направлений притягиваются друг к другу

Каждый из этих токов создает свое собственное магнитное поле. Направления магнитных линий этих полей определяются правилом буравчика. Из рис. 148 видно, что магнитные линии в пространстве между проводниками имеют одинаковые направления, а поэтому стремятся оттолкнуться одна от другой, вследствие чего проводники с токами тоже будут отталкиваться один от другого.

На рис. 149 показаны два параллельных проводника с токами одинакового направления. В этом случае направления магнитных линий в пространстве между проводниками различны, что приводит к взаимному притяжению их, а следовательно, и к взаимному притяжению проводников с токами.

Таким образом, **проводники с токами одинаковых направлений притягиваются, а различных направлений — взаимно отталкиваются.**

Теперь выясним, какова величина силы взаимодействия проводников с токами. Допустим, что прямолинейный проводник с током I_1 очень длинный. Тогда магнитная индукция в точках, расположенных в воздухе на расстоянии a метров от этого проводника, будет равна

$$B_1 = \mu_0 H = \frac{4\pi}{10^7} \cdot \frac{I_1}{2\pi a} = \frac{2I_1}{10^7 a}, \quad (142)$$

где B — магнитная индукция в вольт-секундах на квадратный метр;

I_1 — ток в амперах;

$\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7}$ — магнитная проницаемость вакуума (практически воздуха);

a — расстояние от оси проводника в метрах;

H — напряженность магнитного поля в амперах на метр.

Пусть второй прямолинейный проводник с током I_2 , расположенный параллельно первому проводнику, находится от него на расстоянии a метров. Так как второй проводник находится в магнитном поле первого проводника с током I_1 , то механическая сила, действующая на второй проводник, может быть определена согласно формуле (136)

$$F = B_1 I_2 l_2;$$

но так как

$$B_1 = \frac{2I_1}{10^7 a},$$

то

$$F = \frac{2I_1 I_2 l_2}{a} \cdot 10^{-7}. \quad (143)$$

Пример 82. Определить силу F , действующую на прямолинейный проводник с током $I_2 = 15$ а, длина которого $l_2 = 0,8$ м, если он расположен на расстоянии $a = 0,05$ м от другого прямолинейного весьма длинного провода, по которому течет ток $I_1 = 12$ а. Оба проводника расположены параллельно один другому.

Решение.

$$F = \frac{2I_1 I_2 l_2 \cdot 10^{-7}}{a} = \frac{2 \cdot 12 \cdot 15 \cdot 0,8 \cdot 10^{-7}}{0,05} = 57,6 \cdot 10^{-5} \text{ ньютон.}$$

Если в формуле

$$F = \frac{2I_1 I_2 l_2}{a} \cdot 10^{-7}$$

положить $l_2 = 1$ м, $a = 2$ м и $I_1 = I_2 = 1$ а, то

$$F = \frac{2 \cdot 1(a) \cdot 1(a)}{10^7 \cdot 2(м)} \cdot 1(м) = 10^{-7} \text{ ньютон.}$$

На основании последнего соотношения единице величины тока (1 амперу) можно дать такое определение: один ампер есть величина неизменяющегося электрического тока, который, протекая по каждому из двух параллельных прямолинейных проводов ничтожно малого кругового сечения, расположенных на расстоянии двух метров друг от друга в вакууме, создает между этими проводниками силу взаимодействия в одну десятимиллионную долю ньютона на каждый метр длины.

§ 86. РАБОТА СИЛ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Механические силы, действующие на проводник с током во внешнем магнитном поле, перемещая этот проводник, совершают некоторую работу.

Пусть внешнее однородное магнитное поле направлено от нас за плоскость чертежа перпендикулярно ей, что обозначено крестиками на рис. 150. В этом магнитном поле имеются два оголенных металлических проводника, расположенных параллельно друг к другу и присоединенных к зажимам источника электрической энергии с постоянной электродвижущей силой. Цепь замкнута легким пустотелым металлическим проводником цилиндрической формы, который легко может катиться по оголенным проводам.

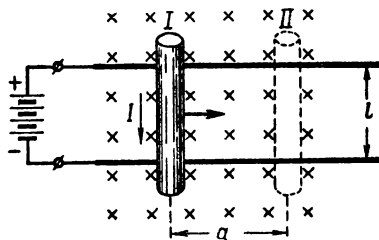


Рис. 150. Под действием силы F проводник с током перемещается (катится) по оголенным проводам

Если источник электрической энергии включен в цепь, то в цилиндрическом подвижном проводнике возникает ток I и на него действует сила

$$F = BIl,$$

где l — активная длина подвижного проводника в метрах.

Направление силы F можно определить по правилу левой руки.

Если под влиянием силы F подвижный проводник будет перемещаться, то работа источника электрической энергии при переносе проводника на расстояние a будет равна

$$A = Fa = BIl a, \quad (144)$$

где A — работа в джоулях.

Пример 83. В однородном магнитном поле, обладающем магнитной индукцией $B = 0,5 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$, перемещается проводник с током $I = 12 \cdot a$, имеющий активную длину $l = 0,4$ м. Определить работу, совершаемую источником электрической энергии, если проводник переместился на расстояние $a = 0,25$ м.

Решение. По формуле (144) находим

$$A = BIl a = 0,5 \cdot 12 \cdot 0,4 \cdot 0,25 = 0,6 \text{ Дж.}$$

Формулу (144) можно представить в несколько ином виде, выразив ее через ток I и магнитный поток Φ .

$$A = BIl a = BIS = I\Phi, \quad (145)$$

где Φ — магнитный поток, пересеченный проводником с током I при его движении в магнитном поле.

Из формулы (145) следует, что работа механической силы при переносе проводника с током в магнитное поле равняется произведению тока I , протекающего в этом проводнике, на магнитный поток Φ , перерезанный проводником при его движении в магнитном поле.

Пример 84. Прямолинейный проводник с током $I = 15$ а, перемещаясь в магнитном поле, перерезал магнитный поток $\Phi = 4$ в-сек. Требуется определить работу, затраченную источником электрической энергии на перемещение этого проводника.

Решение. По формуле (145) находим, что

$$A = I\Phi = 15 \cdot 4 = 60 \text{ дж.}$$

ГЛАВА XVIII

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 87. ИНДУКТИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА В ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ПРОВОДНИКЕ, ПЕРЕМещающЕМся В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Предположим, что прямолинейный проводник, например кусок медной проволоки ab (рис. 151), приводимый в движение внешней механической силой, перемещается в однородном магнитном поле с постоянной скоростью v . Направление магнитных линий на рис. 151 показано крестиками, т. е. магнитные линии уходят за плоскость чертежа перпендикулярно ей, а проводник ab движется перпендикулярно направлению магнитных линий, в направлении вектора скорости v .

При заданном поступательном движении проводника все его свободные электроны будут вместе с ним поступательно перемещаться в магнитном поле с той же скоростью v .

Но, как известно, каждый электрон, движущийся во внешнем магнитном поле, испытывает на себе действие силы F , стремящейся отклонить его в сторону от прямолинейного движения (см. рис. 139). Величина этой силы пропорциональна скорости v поступательного движения электрона и магнитной индукции B внешнего магнитного поля и зависит также от угла, под которым электрон движется по отношению к направлению магнитных линий. Если он движется в направлении, перпендикулярном магнитным линиям, то сила, действующая на него, будет максимальной, и она будет равна нулю, если электрон движется в направлении магнитной линии.

Следовательно, все свободные электроны проводника, движущиеся поступательно вместе с ним, будут испытывать на себе

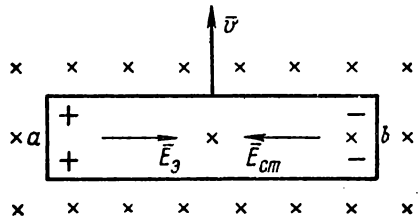


Рис. 151. Перемещение проводника ab в магнитном поле при помощи внешней силы

действие сторонних сил, стремящихся отклонить их в сторону от первоначального направления их поступательного движения. Под влиянием этих сил они будут перемещаться с одного конца проводника на другой, и в результате один конец проводника зарядится отрицательным электричеством (избыток электронов), а другой — положительным (недостаток электронов). Разъединенные электрические заряды создадут в проводнике электростатическое поле, и на концах проводника возникнет разность потенциалов (напряжение U).

Приток электронов на один из концов проводника будет продолжаться до тех пор, пока не уравниваются противоречивые силы. С одной стороны, — это сторонние силы $E_{ст}$, стремящиеся перемещать движущиеся электроны в магнитном поле, и, с другой стороны, — это силы электростатического поля $E_э$ разведенных электрических зарядов, размещенных по концам проводника, стремящиеся вернуть электроны на прежние места (см. рис. 151).

Сторонние силы, перенося электрические заряды с одного конца проводника на другой, навстречу действию сил электрического поля, будут совершать некоторую работу за счет той энергии, которую расходует механическая сила, перемещающая этот проводник в магнитном поле. Эта работа, если не принимать во внимание некоторых потерь энергии, например на выделение тепла, пойдет на образование потенциальной энергии электростатического поля разобщенных электрических зарядов в проводнике. Величина этой энергии, приходящаяся на единичный заряд, численно равна напряжению U на концах проводника.

Если сторонние силы, перенося электрический заряд q с одного конца проводника на другой, затратили работу, равную A , то работа, совершаемая ими при переносе единичного заряда, будет в q раз меньше:

$$E = \frac{A}{q}, \quad (146)$$

где E — величина работы, отнесенная к единичному заряду, — индуктированная электродвижущая сила.

Если в формуле (146) работа A выражена в джоулях, а электрический заряд q — в кулонах, то индуктированная электродвижущая сила будет выражена в вольтах.

Пример 85. Сторонние силы, возникшие в проводнике, движущемся во внешнем магнитном поле, перемещая с одного конца этого проводника на другой количество электричества $q = 0,001$ к, совершают работу $A = 0,05$ дж. Определить индуктированную электродвижущую силу в проводнике.

Решение. По формуле (146) находим

$$E = \frac{A}{q} = \frac{0,05}{0,001} = 50 \text{ в.}$$

Когда наступит равновесие между сторонними силами и силами электрического поля в проводнике, индуктированная элект-

тродвижущая сила в нем будет численно равна напряжению на его концах:

$$E = U.$$

Следует отметить, что индуцированную электродвижущую силу нельзя сравнивать с какой-либо силой, например с действием насоса, качающего воду, так как электродвижущая сила характеризует собой только ту работу, которую совершают сторонние силы, переноса единичный заряд по проводнику.

Итак, если проводник перемещается в магнитном поле, то на его концах накапливаются разноименные электрические заряды, электрическое поле которых обладает некоторым запасом потенциальной электрической энергии. Внутри проводника создаются поле сторонних сил и электрическое поле разобщенных электрических зарядов, взаимно уравновешивающие друг друга.

Теперь допустим, что проводник ab , в котором индуцирована электродвижущая сила E , своими концами присоединяется к какому-либо приемнику электрической энергии, например к электрической лампочке, образуя вместе с ним замкнутую электрическую цепь (рис. 152).

Так как на концах проводника ab имеется напряжение U , то под этим напряжением окажется подключенная к проводнику лампочка. А это значит, что во внешней цепи (лампочка с соединительными проводниками) возникнет электрическое поле, а следовательно, и электрический ток. Электроны с конца проводника b , заряженного отрицательно, через внешнюю цепь (через лампу) будут перемещаться к концу проводника a , заряженного положительно, где они будут нейтрализованы. Но как только часть отрицательных и положительных зарядов проводника ab исчезнет, тотчас же уменьшится напряжение на концах этого проводника, т. е. ослабнет электрическое поле в нем. Сторонние силы теперь получат перевес над силами электрического поля внутри проводника ab и электродвижущая сила E станет больше напряжения U на концах проводника. Это приведет к тому, что внутри проводника ab возобновится движение свободных электронов с положительно заряженного конца его к отрицательно заряженному концу. Таким образом, во всей замкнутой цепи будет существовать электрический ток проводимости, который в данном случае называется **индуцированным током**. Он будет проходить в цепи до тех пор, пока в проводнике ab будет

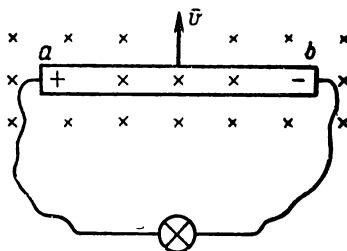


Рис. 152. Электрическая цепь, в которой индуцируются электродвижущая сила и ток

существовать поле сторонних сил, т. е. пока проводник будет перемещаться в магнитном поле при помощи какой-либо внешней механической силы.

Следует обратить внимание на то, что работа индуктированного тока в данной цепи совершается за счет механической работы внешних сил, перемещающих проводник ab в магнитном поле. Чем больше индуктированный ток в цепи, тем больше внешняя сила затрачивает энергии на перемещение проводника ab в магнитном поле.

При наличии тока в рассматриваемой цепи напряжение на концах проводника ab будет меньше, чем индуктированная электродвижущая сила в этом проводнике, так как часть электродвижущей силы будет израсходована внутри самого проводника ab :

$$U_{ab} = E - U_0,$$

где E — индуктированная электродвижущая сила в проводнике ab ;

U_0 — падение напряжения внутри проводника ab ;

U_{ab} — напряжение на концах проводника ab , расходуемое во внешней цепи.

В рассматриваемой цепи электроны движутся от отрицательно заряженного конца проводника ab (от минус-зажима) к положительно заряженному концу его (к плюс-зажиму) по внешней цепи. Но согласно принятому условию индуктированный ток в данной цепи имеет направление от плюс-зажима проводника ab к минус-зажиму по внешней цепи и затем внутри него от минус-зажима к плюс-зажиму.

Возникновение в проводнике индуктированной электродвижущей силы называется электромагнитной индукцией. Это явление было открыто в 1831 г. английским физиком **М. Фарадеем** (1791—1867). Помимо электромагнитной индукции, Фарадей открыл закон электролиза, явление диамагнетизма и сделал ряд научных работ в области физики и химии.

Фарадей считал, что причиной возникновения индуктированной электродвижущей силы в проводнике является процесс «пересечения» проводником магнитных линий при его перемещении во внешнем магнитном поле.

Если проводник перемещается во внешнем магнитном поле и на пути своего движения пересекает магнитные линии его, то в этом проводнике индуктируется электродвижущая сила.

Индуктированная электродвижущая сила может возникнуть и в неподвижном проводнике, если он находится в перемещающемся магнитном поле. Следовательно, для создания индуктированной электродвижущей силы необходимо движение проводни-

ка относительно внешнего магнитного поля или магнитного поля — относительно неподвижного проводника.

Если проводник движется в магнитном поле, не пересекая его магнитных линий, т. е. скользит вдоль них, то индуцированная электродвижущая сила в нем будет равна нулю.

Направление индуцированной электродвижущей силы в прямолинейном проводнике, движущемся в магнитном поле перпендикулярно магнитным линиям (рис. 153), определяется правилом правой руки: если ладонь правой руки расположить в магнитном поле навстречу магнитным линиям так, чтобы отставленный большой палец указал направление движения проводника, то остальные четыре вытянутых пальца покажут направление индуцированной электродвижущей силы.

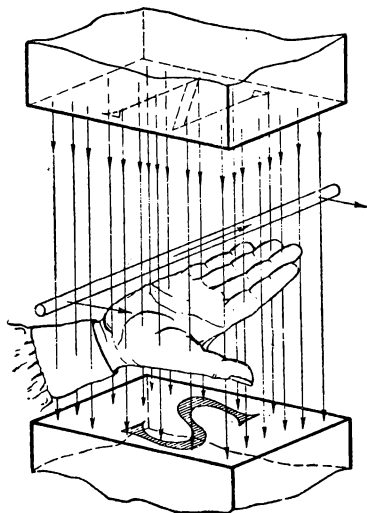


Рис. 153. Рисунок, поясняющий правило правой руки

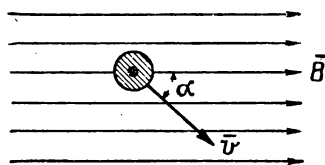


Рис. 154. Прямолинейный проводник движется под углом α к магнитным линиям

Величина индуцированной электродвижущей силы E в прямолинейном проводнике пропорциональна величине магнитной индукции B , скорости движения проводника v и активной длине проводника l , т. е. той части проводника, которая пересекается магнитными линиями поля:

$$E = Blv, \quad (147)$$

где E — индуцированная электродвижущая сила в вольтах;
 B — магнитная индукция в вольт-секундах на квадратный метр;

l — активная длина проводника в метрах;

v — скорость движения проводника в метрах в секунду.

Если прямолинейный проводник при движении в магнитном поле пересекает магнитные линии не под прямым углом, а под каким-то иным углом α (рис. 154), то величина индуцированной электродвижущей силы в нем определяется по формуле

$$E = Blv \cdot \sin \alpha. \quad (148)$$

Следовательно, если $\alpha = 0$, т. е. проводник, перемещаясь в магнитном поле, скользит вдоль магнитных линий, то индуктированная электродвижущая сила в нем будет равна нулю, так как $\sin 0^\circ = 0$.

Пример 86. Прямолинейный проводник, активная длина которого $l = 0,8$ м, перемещается в однородном магнитном поле, имеющем магнитную индукцию $B = 1,2 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$. Определить индуктированную электродвижущую силу в проводнике, если проводник, двигаясь со скоростью $v = 2 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, пересекает магнитные линии поля под углом $\alpha = 30^\circ$.

Решение. По формуле (148) находим

$$E = Blv \cdot \sin \alpha = 1,2 \cdot 0,8 \cdot 2 \cdot 0,5 = 0,96 \text{ в.}$$

§ 88. ИНДУКТИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ И КАТУШКЕ

Индуктированная электродвижущая сила возникает во всяком замкнутом контуре, если магнитный поток, пронизывающий его, изменится с течением времени. Покажем это на следующем простом опыте. Пусть катушка, имеющая большое число витков проволоки, замкнута на гальванометр (прибор, измеряющий малые токи) с двусторонней шкалой (рис. 155). Если на-

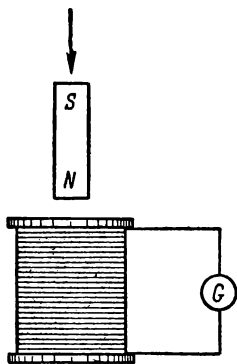


Рис. 155. При приближении постоянного магнита к катушке и удалении от нее в катушке индуктируется электродвижущая сила

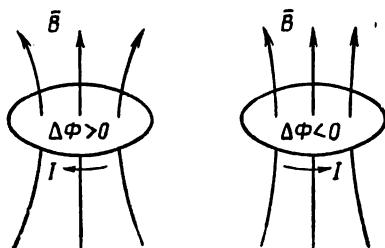


Рис. 156. При возрастании магнитного потока индуктированный ток направлен против часовой стрелки, а при убывании магнитного потока — по часовой стрелке

чать приближать постоянный стержневой магнит к катушке, например, северным полюсом N , то стрелка гальванометра отклонится от нулевого положения, например, вправо от нуля. Это значит, что в цепи катушка — гальванометр возник электрический ток. При прекращении движения магнита стрелка гальванометра возвращается к нулевому положению, что свидетель-

ствуем о прекращении тока в катушке. Если, наоборот, начать удалять магнит от катушки, то стрелка гальванометра вновь отклонится, но в другую сторону, т. е. влево от нуля.

Чем быстрее движется магнит или чем быстрее изменяется магнитный поток, пронизывающий катушку, тем больший ток индуцируется в катушке.

Направление индуцированного тока в катушке зависит от направления движения магнитов, или, иначе говоря, от направления движения магнитных линий, пронизывающих катушку.

Э. Х. Ленц сформулировал закон, устанавливающий направление индуцированного тока в электрической цепи. Этот закон, вошедший в электротехнику под названием **правила Ленца**, гласит: **индуцированный ток в проводнике (контуре) возникает всякий раз такого направления, при котором он противодействует причине, вызвавшей его.** Если, например, катушку (контур) пронизывает некоторый уменьшающийся во времени магнитный поток, то в катушке (контуре) индуцируется ток такого направления, при котором он создает свое собственное магнитное поле, противодействующее уменьшению основного магнитного поля, т. е. направление магнитного поля тока и направление основного магнитного поля в этом случае должны совпасть.

Наоборот, если магнитный поток, пронизывающий катушку (контур), увеличивается, то индуцированный ток имеет такое направление, при котором он создает магнитный поток, направленный навстречу внешнему магнитному потоку, т. е. противодействующий его росту. Следовательно, если число магнитных линий, пронизывающих площадь, ограниченную контуром, увеличивается, т. е. $\Delta\Phi > 0$ (читать: дельта фи больше нуля), то для наблюдателя, смотрящего по направлению магнитных линий, индуцированный ток направлен против часовой стрелки (рис. 156). Наоборот, если число магнитных линий уменьшается ($\Delta\Phi < 0$), то для наблюдателя, смотрящего в направлении магнитных линий, индуцированный ток направлен по часовой стрелке.

Применим правило Ленца к рассмотренному выше опыту с катушкой. Если постоянный магнит приближается к катушке своим северным полюсом, то в ней индуцируется ток такого направления, который своим магнитным полем противодействует движению магнитного поля постоянного магнита и в соответствии с этим движению самого магнита. Следовательно, в катушке возникает индуцированный ток такого направления, что на конце катушки, обращенном к приближающемуся северному полюсу магнита, возникает также северный полюс, противодействующий приближению последнего. Если начать удалять магнит от катушки, то индуцированный ток в ней изменит свое направление на обратное и в соответствии с этим на конце катушки, обращенном к удаляющемуся северному полюсу магнита,

возникнет южный полюс, противодействующий удалению последнего.

Величина индуцированной электродвижущей силы в контуре прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур.

Если за время Δt (дельта t) секунд магнитный поток изменился на величину $\Delta\Phi$ (дельта фи) вольт-секунд, то величина индуцированной электродвижущей силы в вольтах численно равна отношению $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, т. е.

$$E = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (149)$$

Если в формуле (149) положить, что $\Delta\Phi = 1$ вольт-секунде, а $\Delta t = 1$ секунде, то $E = 1$ вольту.

Следовательно, если в контуре магнитный поток изменяется на 1 вольт-секунду в 1 секунду, то в этом контуре индуцируется электродвижущая сила в 1 вольт.

Теперь выясним значение знака минус в формуле (149) перед отношением $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$.

Так как индуцированная электродвижущая сила в контуре может иметь различные направления, то ее надо считать величиной алгебраической, т. е. при одном ее направлении в контуре она должна условно считаться положительной, а при обратном направлении — отрицательной. Точно так же и магнитный поток — величина алгебраическая, так как он по отношению к контуру может иметь разные направления, т. е. может входить в него с одной или с другой стороны. Какие же направления индуцированной электродвижущей силы и магнитного потока принять за положительные? Считают, что условно принятый положительный магнитный поток, пронизывающий контур, и условно принятая положительная электродвижущая сила, индуцированная в этом контуре, связаны друг с другом правилом буравчика правовинтовой системы, т. е. если вращательное движение буравчика совпадает с положительным направлением электродвижущей силы в контуре, то поступательное движение буравчика совпадает с положительным направлением магнитного потока, пронизывающего этот контур (рис. 157). Стало быть, если $\Delta\Phi > 0$, т. е. приток магнитного потока положительный, то индуцированная электродвижущая сила будет отрицательной, так как все выражение $\left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right)$ имеет отрицательный знак.

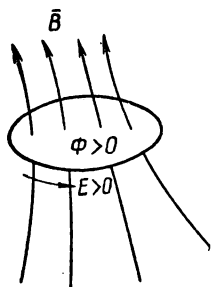


Рис. 157. Направления положительного магнитного потока и положительной индуцированной электродвижущей силы связаны правилом буравчика

А это значит, что она с магнитным потоком составит левовинтовую систему (рис. 158, а). Наоборот, если $\Delta\Phi < 0$, т. е. прирост магнитного потока отрицательный, то индуцированная электродвижущая сила будет положительной, так как

$$\left[-\frac{(-\Delta\Phi)}{\Delta t} \right] = +\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ — величина положительная.}$$

А это значит, что в данном случае магнитный поток составляет с электродвижущей силой правовинтовую систему (рис. 158, б).

Если вместо одного контура (витка) взять катушку, имеющую w витков, то индуцированная в ней электродвижущая сила будет в w раз больше, чем в каждом из ее отдельных витков, т. е.

$$E = -w \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ вольт.} \quad (150)$$

Пример 87. В катушке, имеющей число витков $w = 500$, магнитный поток, пронизывающий ее, изменяется равномерно на величину $\Delta\Phi = -0,2$ в-сек в течение $\Delta t = 0,5$ сек. Определить индуцированную электродвижущую силу в катушке.

Решение. По формуле (150) находим

$$E = -w \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -500 \frac{-0,2}{0,5} = 200 \text{ в.}$$

Формула (150) имеет важный физический смысл. Если в контуре индуцируется электродвижущая сила, то это значит, что в проводниках контура возникло электрическое поле. Под влиянием сил индуцированного электрического поля свободные электроны получают направленное и упорядоченное движение вдоль участков контура, т. е. в контуре возникает индуцированный ток.

Индуктированное электрическое поле возникает не только в проводниках замкнутого контура, но и во всем пространстве, где есть переменное магнитное поле. Это легко обнаружить, помещая контур в различные области переменного магнитного поля.

На основании сказанного можно сделать следующий вывод: в пространстве, где есть изменяющееся магнитное поле, возникает (индуцируется) изменяющееся электрическое поле. Эти поля взаимосвязаны, взаимообусловлены, органически связаны в едином электромагнитном поле. Взаимодействие этих полей сводится к взаимному переходу их друг в друга, к взаимному обмену энергией, что и является причиной перемещения электромагнитной энергии в пространстве.

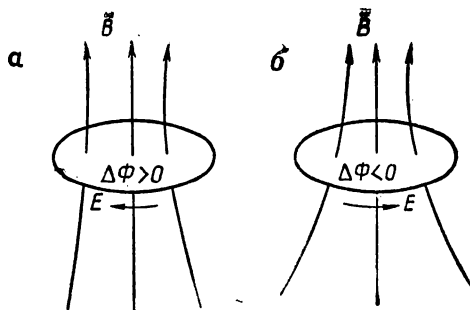


Рис. 158. При $\Delta\Phi > 0$ электродвижущая сила отрицательна, а при $\Delta\Phi < 0$ положительна

Индуктированное электрическое поле, о котором здесь идет речь, коренным образом отличается от электростатического поля. Это различие в основном сводится к следующему:

1. Электростатическое поле создается системой относительно неподвижных электрических зарядов в пространстве, а индуктированное электрическое поле — в результате изменения магнитного поля.

2. Электрические линии электростатического поля имеют начало на положительных электрических зарядах и концы — на отрицательных зарядах, а силовые линии индуктированного электрического поля замкнуты на себя. Они охватывают магнитные линии изменяющегося магнитного поля.

3. Электростатическое поле не сопровождается магнитным полем, а индуктированное электрическое поле неразрывно связано с изменяющимся магнитным полем, и всякое изменение электрического поля сопровождается возникновением переменного магнитного поля.

4. Работа сил электростатического поля при переносе электрического заряда по любому замкнутому контуру равна нулю, а работа сил индуктированного поля по замкнутому контуру отлична от нуля. Это значит, что электродвижущая сила в любом замкнутом контуре, помещенном в электростатическое поле, равна нулю, а в индуктированном электрическом поле она отлична от нуля и пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур.

5. В электростатическом поле действуют силы взаимодействия электрических зарядов — силы центральные, т. е. силы, направленные по прямой линии, соединяющей центры взаимодействующих зарядов, а в индуктированном электромагнитном поле действуют силы не электростатического происхождения — силы сторонние, обусловленные действием сил магнитного поля на движущийся электрический заряд и сил электрического индуктированного поля.

Всякому изменению магнитного поля противодействует индуктированное электрическое поле, которое стремится создать магнитное поле, попутное исчезающему и встречное возрастающему магнитному полю.

§ 89. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА САМОИНДУКЦИИ

Допустим, что в катушке, имеющей ω витков, протекает постоянный ток I (рис. 159). Этот ток создает в данной катушке постоянный магнитный поток Φ , пронизывающий ее витки.

Произведение величины магнитного потока Φ , пронизывающего витки катушки, на число витков ω этой катушки называется числом потокосцеплений, или, иначе, потоком, сцепленным с витками катушки, и обозначается буквой ψ (читать «пси»).

Следовательно,

$$\psi = w\Phi, \quad (151)$$

где w — число витков катушки;
 Φ — магнитный поток в катушке в вольт-секундах;
 ψ — число потокоцеплений (поток, сцепленный с витками катушки) в вольт-секундах.

Если данная катушка не имеет сердечника из ферромагнитного материала, то число потокоцеплений ψ в катушке пропорционально величине тока I в ее витках, т. е.

$$\psi = w\Phi = LI, \quad (152)$$

где L — коэффициент пропорциональности, называемый индуктивностью, или, иначе, коэффициентом самоиндукции катушки.

Выясним физический смысл индуктивности (коэффициента самоиндукции) катушки, ее размерность и единицы измерения.

Из формулы (152) следует, что

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{w\Phi}{I}, \quad (153)$$

т. е. индуктивность катушки численно равна потоку, сцепленному с витками катушки, при величине тока, равной единице.

Исходя из формулы (153), выясним размерность индуктивности катушки:

$$[L] = \left[\frac{\psi}{I} \right] = \frac{\text{вольт-секунда}}{\text{ампер}} = \text{ом} \cdot \text{секунда} = \text{генри};$$

т. е. размерность индуктивности в системе единиц МКСА выражается в генри.

В соответствии с этим за единицу измерения индуктивности в системе единиц МКСА принят 1 генри (1 гн, 1 Н).

Если $\psi = 1$ в-сек, $I = 1$ а, то

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{1 \text{ вольт-секунда}}{1 \text{ ампер}} = 1 \text{ генри},$$

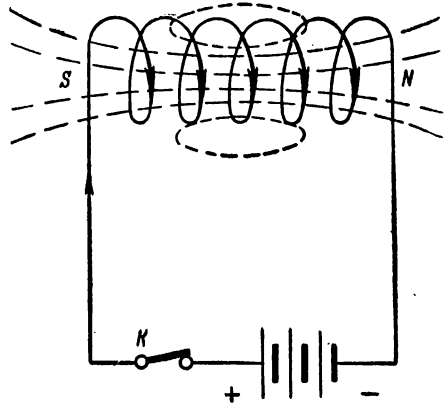


Рис. 159. При замыкании цепи в катушке индуцируется электродвижущая сила самоиндукции

т. е. катушка обладает индуктивностью в 1 генри, если в ней при токе, равном одному амперу, поток, сцепленный с ее витками, равен 1 вольт-секунде.

Таблица 31

Единицы измерения индуктивности в системе единиц МКСА

Наименование величины и ее обозначение	Название единицы	Обозначение		Соотношение с основной единицей
		русское	международное	
Индуктивность (коэффициент самоиндукции) L	генри	$гН$	Н	—
	миллигенри	$мгН$	мН	$10^{-3} гН$
	микрогенри	$мкгН$	μН	$10^{-6} гН$

Зная индуктивность L катушки, величину постоянного тока I в ней, а также число витков ω катушки, можно определить величину магнитного потока Φ в этой катушке по формуле

$$\Phi = \frac{LI}{\omega}, \quad (154)$$

где Φ — магнитный поток в вольт-секундах;
 I — величина тока в амперах;
 L — индуктивность в генри.

Теперь допустим, что в рассматриваемой катушке протекает переменный ток i , т. е. такой ток, который с течением времени изменяется по величине. В соответствии с этим в катушке будет переменный магнитный поток, так как его величина Φ пропорциональна величине тока I , создающего его.

Но если витки катушки пронизывает переменный магнитный поток, то в ней должна индуцироваться электродвижущая сила.

Возникновение в катушке индуцированной электродвижущей силы под влиянием изменения ее собственного магнитного потока называется самоиндукцией, а возникающая при этом электродвижущая сила — электродвижущей силой самоиндукции.

Величина индуцированной электродвижущей силы самоиндукции катушки пропорциональна скорости изменения потока, сцепленного с витками этой катушки, т. е.

$$e_L = - \frac{\Delta\psi}{\Delta t}, \quad (155)$$

где e_L — электродвижущая сила самоиндукции;
 $\Delta\psi$ — приращение потока, сцепленного с витками катушки, за элементарный отрезок времени Δt .

Но, как было выяснено выше, поток ψ , сцепленный с витками катушки, равен

$$\psi = Li,$$

где L — индуктивность катушки, поэтому формуле (155) можно придать такой вид:

$$e_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (156)$$

т. е. величина электродвижущей силы самоиндукции в катушке пропорциональна скорости изменения тока в ней.

Следовательно, чем быстрее изменяется ток в катушке, тем при прочих равных условиях больше будет в ней электродвижущая сила самоиндукции.

Пример 88. В катушке, индуктивность которой $L = 0,2$ гн, ток убывает равномерно за каждые 0,01 сек. на 2 а. Определить индуцированную электродвижущую силу самоиндукции в катушке.

Решение. В данном случае

$$\Delta I = -2 \text{ а и } \Delta t = 0,01 \text{ сек.}$$

По формуле (156) найдем

$$e_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = -0,2 \cdot \frac{-2}{0,01} = 40 \text{ в.}$$

Исходя из формулы (156), можно дать единице измерения индуктивности, равной одному генри, такое определение: катушка обладает индуктивностью, равной 1 генри, если при равномерном изменении тока в ней на 1 ампер в каждую секунду индуцируется электродвижущая сила самоиндукции в 1 вольт.

Знак минус, стоящий в правой части формулы (149), отражает собой известное правило Ленца, которое в данном случае можно сформулировать так: электродвижущая сила самоиндукции всякий раз имеет такое направление в катушке, при котором она противодействует изменению величины тока в ней.

Если, например, ток в катушке возрастает, то электродвижущая сила самоиндукции направлена навстречу току, противодействуя его росту, и, наоборот, когда ток в катушке убывает, она направлена попутно с ним, противодействуя его убыванию. Источник электрической энергии в первом случае совершает некоторую работу, преодолевая сопротивление электродвижущей силы самоиндукции. Эта работа идет на создание энергии магнитного поля катушки. Во втором же случае, когда электродвижущая сила действует попутно с током, энергия магнитного поля переходит в энергию электрического поля, расходуемую в данной цепи.

С явлением самоиндукции мы встречаемся во всех электрических цепях, обладающих индуктивностью, в которых проходит изменяющийся по величине ток.

Для примера рассмотрим режим в цепи с катушкой индуктивности при подключении ее к источнику электрической энергии с постоянным напряжением и при отключении от него.

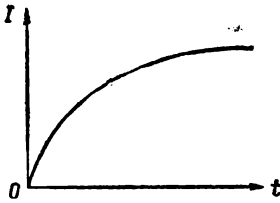


Рис. 160. График изменения тока в катушке при подключении ее к источнику электрической энергии с постоянным напряжением

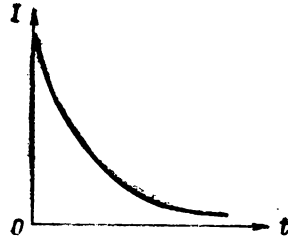


Рис. 161. График изменения тока в катушке при отключении ее от источника электрической энергии с постоянным напряжением

Если катушку, обладающую некоторой индуктивностью и омическим сопротивлением, подключить к источнику электрической энергии с постоянным напряжением, то ток в катушке будет нарастать не сразу, а плавно, непрерывно изменяя свою величину по строго определенному закону (рис. 160). Причина подобного изменения тока в катушке — электродвижущая сила самоиндукции. В результате нарастания тока в катушке увеличивается в ней и магнитный поток, создаваемый этим током. Изменяющийся же магнитный поток индуцирует в катушке электродвижущую силу самоиндукции, направленную противоположно току и потому противодействующую его нарастанию. Чем больше индуктивность катушки, тем больше электродвижущая сила самоиндукции в ней и тем медленнее нарастает ток в катушке при подключении ее к источнику с постоянным напряжением. Практически ток в катушке достигает своего постоянного значения обычно в течение долей секунды.

Если катушку, по которой течет постоянный ток I , отключить от источника электрической энергии и замкнуть на некоторое сопротивление r_1 , то ток в катушке не исчезнет мгновенно (скачком), а будет более или менее плавно спадать до нуля (рис. 161). Причина этого — электродвижущая сила самоиндукции. Когда ток в катушке уменьшается, одновременно с этим уменьшается и магнитный поток, создаваемый им. В результате в катушке индуцируется электродвижущая сила самоиндукции, поддерживающая ток в цепи, так как она направлена попутно с ним.

Чем больше индуктивность катушки, тем медленнее спадает ток в ней при отключении ее от источника электрической энергии с постоянным напряжением.

Чтобы судить о том, насколько быстро исчезает ток в катушке при отключении ее от источника и замыкании на сопротивление r_1 , ввели величину, называемую постоянной времени τ (читать «тау»). Постоянная времени τ — это отрезок

времени, в течение которого ток в катушке уменьшится в $e = 2,718$ (основание натуральных логарифмов) раз по сравнению с начальным его значением. Постоянную времени τ можно определить по следующей формуле:

$$\tau = \frac{L}{r + r_1}, \quad (157)$$

где τ — постоянная времени в секундах;
 r — омическое сопротивление катушки в омах;
 r_1 — омическое сопротивление, на которое замыкается катушка после ее отключения от источника;
 L — индуктивность катушки в генри.

Пример 89. Определить постоянную времени τ цепи, если ее активное сопротивление $r = 2$ ом, индуктивность $L = 0,01$ гн, а сопротивление, на которое она замыкается, равно $r_1 = 8$ ом.

Решение. Применяя формулу (157), находим

$$\tau = \frac{L}{r + r_1} = \frac{0,01}{2 + 8} = 0,001 \text{ сек.},$$

т. е. ток в катушке уменьшится в 2,718 раз по сравнению с начальным через 0,001 сек.

С явлением самоиндукции приходится считаться во всех электрических цепях, где есть изменяющийся по величине ток. Если индуктивность катушки велика, то при больших скоростях изменения тока в ней индуктированная электродвижущая сила самоиндукции может достигать очень больших величин.

Чтобы индуктивность катушки практически свести к нулю, применяют так называемую **бифилярную намотку** катушек (рис. 162). В этом случае в каждом двух соседних витках ток имеет противоположные направления, что создает два встречных магнитных потока, уравнивающих друг друга. Вследствие этого индуктированная электродвижущая сила в катушке практически сводится к нулю при всяких изменениях тока.

В момент отключения катушки от источника электрической энергии индуктированная электродвижущая сила может оказаться чрезмерно большой, и при этом может произойти пробой изоляции витков катушки. Ток в катушке после отключения ее от источника электрической энергии называется **экстраток** при размыкании. Он обычно длится всего несколько долей секунды. При размыкании цепи, обладающей индуктивностью, в месте разрыва ее образуется искра, через которую проходит экстраток размыкания. Эта искра, обладающая большей темпера-

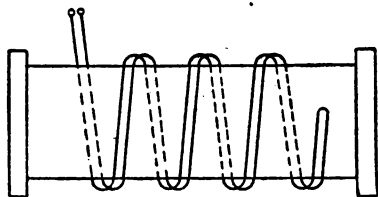


Рис. 162. Катушка с бифилярной намоткой

турой, обжигает разрывающиеся контакты, например в ключе телеграфного аппарата М-44. При частых замыканиях и размыканиях они окисляются и проводимость их резко уменьшается. Поэтому контакты обычно покрывают слоем тугоплавкого неокисляющегося материала, например платины.

§ 90. ИНДУКТИВНОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КАТУШЕК

1. Цилиндрическая катушка с однослойной обмоткой

Допустим, что в цилиндрической однослойной катушке, имеющей число витков w , длину l и диаметр цилиндрического каркаса D , проходит постоянный ток I (рис. 163).

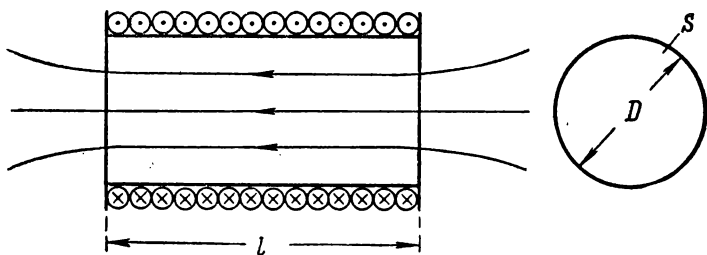


Рис. 163. Цилиндрическая однослойная катушка

Предположим также, что длина катушки l значительно больше (в десятки раз) ее диаметра D . В этом случае напряженность магнитного поля внутри катушки равна

$$H = \frac{wl}{l},$$

где H — напряженность магнитного поля катушки в амперах на метр;

I — величина тока в катушке в амперах;

l — длина катушки в метрах.

Магнитная индукция

$$B = \mu H = \mu \frac{wl}{l},$$

где B — магнитная индукция в вольт-секундах;

μ — магнитная проницаемость в генри на метр.

Магнитный поток в катушке

$$\Phi = BS = \frac{\mu wIS}{l},$$

где Φ — магнитный поток в вольт-секундах;

S — площадь поперечного сечения катушки в квадратных метрах.

Поток, сцепленный с витками катушки, равен

$$\psi = \omega \Phi = \frac{\omega^2 I \mu S}{l},$$

где ψ — поток, сцепленный с витками катушки, в вольт-секундах.

Из последнего выражения находим индуктивность катушки

$$L = \frac{\psi}{I} = \frac{\omega^2 I \mu S}{l I},$$

или

$$L = \frac{\omega^2 \mu S}{l} \quad (158)$$

где L — индуктивность в генри.

Пример 90. Определить индуктивность однослойной цилиндрической катушки, имеющей число витков $\omega = 500$, длину $l = 0,25$ м, площадь поперечного сечения цилиндрического каркаса $S = 0,0004$ м² и магнитную проницаемость сердечника $\mu = \frac{4\pi}{10^7} \frac{\text{гн}}{\text{м}}$.

Решение. Применяя формулу (158), находим

$$L = \frac{\omega^2 \mu S}{l} = \frac{500^2 \cdot 4\pi \cdot 0,0004}{10^7 \cdot 0,25} = 0,0005 \text{ генри.}$$

Если длина l катушки мало отличается от диаметра цилиндрического каркаса ее, то в формулу (158) вводят поправочный коэффициент k , зависящий от отношения диаметра D катушки к ее длине l .

Т а б л и ц а 32

Зависимость между коэффициентом k и отношением диаметра катушки D к ее длине l

$\frac{D}{l}$	k	$\frac{D}{l}$	k	$\frac{D}{l}$	k	$\frac{D}{l}$	k
0,00	1	0,40	0,85	0,85	0,72	2,5	0,47
0,05	0,98	0,45	0,83	1,00	0,69	3,0	0,43
0,10	0,96	0,50	0,82	1,10	0,67	3,5	0,39
0,15	0,94	0,55	0,80	1,20	0,65	4,0	0,36
0,20	0,92	0,60	0,79	1,40	0,61	4,5	0,34
0,25	0,90	0,65	0,77	1,60	0,58	5	0,33
0,30	0,88	0,70	0,76	1,80	0,55	6	0,28
0,35	0,87	0,75	0,75	2,00	0,53	7	0,26

В табл. 32 приведены значения поправочного коэффициента k для разных значений отношения $\frac{D}{l}$. Формула для расчета од-

нослойных цилиндрических катушек в этом случае принимает следующий вид:

$$L = k \frac{\omega^2 \mu_r S}{l} \quad (158')$$

Формуле (158') можно придать несколько иной вид, сделав следующие подстановки:

$$S = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{и} \quad \omega_0 = \frac{\omega}{l}.$$

Тогда формула (158') принимает следующий вид:

$$L = k \pi^2 \omega_0^2 D^2 l \mu_r \cdot 10^{-7}, \quad (159)$$

где μ_r — относительная магнитная проницаемость сердечника катушки;

ω_0 — число витков, приходящееся на один метр длины катушки;

l — длина катушки в метрах;

L — индуктивность катушки в генри.

Пример 91. Определить индуктивность однослойной цилиндрической катушки, у которой $l = 0,4$ м, $D = 0,04$ м, $\omega_0 = 500 \frac{\text{витков}}{\text{м}}$ и относительная магнитная проницаемость сердечника катушки $\mu_r = 1$.

Решение. По табл. 32 находим значение коэффициента k , который при $\frac{D}{l} = \frac{0,04}{0,4} = 0,1$ составляет 0,96.

По формуле (159) находим

$$\begin{aligned} L &= k \pi^2 \omega_0^2 D^2 l \mu_r \cdot 10^{-7} = \\ &= 0,96 \cdot 3,14^2 \cdot 500^2 \cdot 0,04^2 \cdot 0,4 \cdot 1 \cdot 10^{-7} \approx 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ гн.} \end{aligned}$$

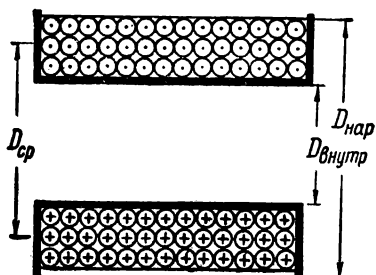


Рис. 164. Многослойная цилиндрическая катушка в разрезе

2. Цилиндрическая катушка с многослойной обмоткой

Для увеличения индуктивности катушки на ее каркас наносят обмотку, состоящую из нескольких слоев (рис. 164).

Индуктивность многослойной цилиндрической катушки определяется по формуле

$$L = m^2 L_{ср}, \quad (160)$$

где m — число всех слоев обмотки катушки;
 $L_{\text{ср}}$ — индуктивность однослойной катушки, у которой диаметр равен сумме наружного и внутреннего диаметров многослойной катушки:

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{внутр}} + D_{\text{нар}}}{2}.$$

Пример 92. Требуется определить индуктивность многослойной цилиндрической катушки, у которой число слоев $m=6$, диаметр каркаса $D=0,05$ м и длина намотки (катушки) $l=0,12$ м. Толщина провода с изоляцией $d=0,5$ мм и относительная магнитная проницаемость сердечника катушки $\mu_r=1$.

Решение. Толщина шести слоев провода

$$md = 6 \cdot 0,5 = 3 \text{ мм} = 0,003 \text{ м}.$$

Наружный диаметр обмотки

$$D_{\text{нар}} = D_{\text{внутр}} + 2 \cdot 0,3 = 5 + 0,6 = 5,6 \text{ см} = 0,056 \text{ м}.$$

Средний диаметр обмотки

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{внутр}} + D_{\text{нар}}}{2} = \frac{5 + 5,6}{2} = 5,3 \text{ см} = 0,053 \text{ м}.$$

Отношение диаметра $D_{\text{ср}}$ к длине l катушки

$$\frac{k_{\text{ср}}}{l} = \frac{0,053}{0,12} = 0,44.$$

По табл. 32 определяем коэффициент k , который для $\frac{D_{\text{ср}}}{l} = 0,44$ равен 0,83.

Число витков w_0 на один метр длины катушки

$$w_0 = \frac{1}{d} = \frac{1}{0,0005} = 2000.$$

Индуктивность катушки согласно формулам (159) и (160) равна

$$L = m^2 L_{\text{ср}} = m^2 k \pi^2 w_0^2 D_{\text{ср}}^2 \mu_r \cdot 10^{-7} = \\ = 6^2 \cdot 0,83 \cdot 3,14^2 \cdot 2000^2 \cdot 0,053^2 \cdot 0,12 \cdot 1 \cdot 10^{-7} \approx 0,04 \text{ гн}.$$

В технике связи применяются самые разнообразные типы катушек как с постоянной, так и с переменной индуктивностью.

На рис. 165 показаны однослойные цилиндрические катушки с постоянной индуктивностью, применяемые в радиотехнике для УКВ (ультракоротких волн). Отличительная особенность этих катушек та, что остов их изготавливается из керамики, а обмотка

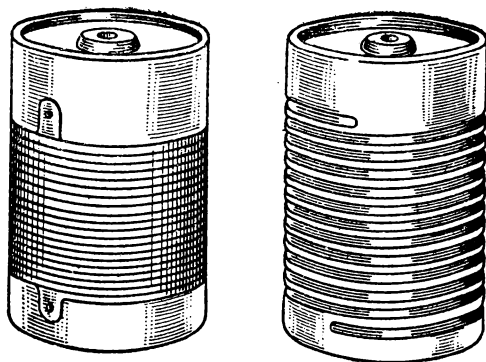


Рис. 165. Катушки индуктивности с обмоткой в виде спиральной ленты из вожженого в керамику серебра

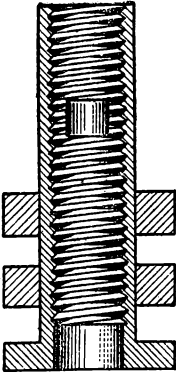


Рис. 166. Катушка с сердечником из магнетодиэлектрика, показанная в разрезе

представляет собой спиральную ленту из вожженого в керамику серебра. Индуктивность таких катушек колеблется от сотых долей микрогенри до нескольких десятков микрогенри.

На рис. 166 показана катушка индуктивности с сердечником из магнетодиэлектрика (карбонильное железо, порошкообразный пермаллой, альсифер и др.), широко применяемая в радиотехнике. Вдвигая или выдвигая сердечник, можно соответственно увеличивать или уменьшать индуктивность катушки.

§ 91. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ВЗАИМОИНДУКЦИИ

Допустим, что две катушки расположены в непосредственной близости одна от другой (рис. 167).

Одна из этих катушек, первичная, имеет число витков w_1 , а другая, вторичная, — w_2 . Первичная катушка присоединена к источнику электрической энергии с постоянным напряжением U_1 , и в ней течет постоянный ток I_1 , создающий постоянный магнитный поток Φ_1 . Часть этого магнитного потока $\Phi_{1,2}$ пронизывают витки не только первичной, но и вторичной катушки.

Следовательно, поток, сцепленный с витками вторичной катушки, равен

$$\psi_{1,2} = w_2 \Phi_{1,2}.$$

А так как магнитный поток $\Phi_{1,2}$ пропорционален току I_1 , то и поток, сцепленный с витками вторичной катушки, также пропорционален току I_1 :

$$\psi_{1,2} = w_2 \Phi_{1,2} = M I_1, \quad (161)$$

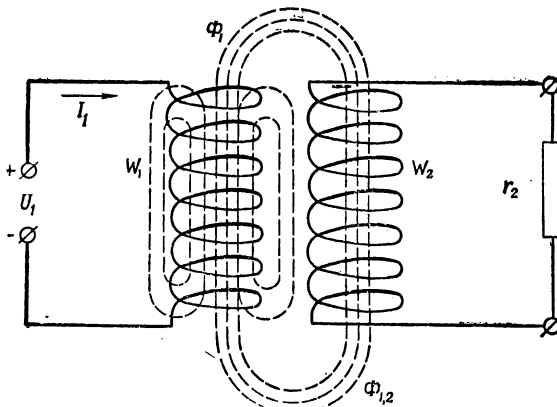


Рис. 167. Две катушки индуктивно связаны друг с другом

где M — коэффициент пропорциональности, называемый взаимной индуктивностью катушек, или, иначе, коэффициентом взаимной индукции их.

Из формулы (161) следует, что

$$M = \frac{\psi_{1,2}}{I_1} = \frac{w_2 \Phi_{1,2}}{I_1}, \quad (162)$$

т. е. взаимная индуктивность двух индуктивно связанных катушек численно равна потоку, сцепленному с витками одной из этих катушек, при величине тока, равной единице, в другой катушке.

Исходя из равенства (162), выясним размерность взаимной индуктивности:

$$[M] = \left[\frac{\psi_{1,2}}{I_1} \right] = \frac{\text{в-сек}}{\text{ампер}} = \text{ом-секунда} = \text{генри},$$

т. е. размерность взаимной индуктивности в системе единиц МКСА выражается в генри.

В соответствии с этим за единицу измерения взаимной индуктивности в системе единиц МКСА принят 1 генри (1 гн, 1 Н).

Если в формуле (162) положить, что $\psi_{1,2} = 1$ в-сек и $I_1 = 1$ а, то будем иметь:

$$M = \frac{\psi_{1,2}}{I_1} = \frac{1 \text{ в-сек}}{1 \text{ а}} = 1 \text{ генри},$$

т. е. две катушки обладают индуктивностью в 1 генри, если при токе, равном одному амперу, в одной из них поток, сцепленный с витками второй катушки, равен 1 вольт-секунде.

Теперь допустим, что в первичной катушке протекает переменный ток I_1 . В соответствии с этим магнитный поток Φ_1 , создаваемый им, а также и поток $\psi_{1,2}$, сцепленный с витками вторичной катушки, являются переменными во времени. Но если поток $\psi_{1,2}$, сцепленный с витками вторичной катушки, — переменный, то в витках этой катушки должна индуцироваться электродвижущая сила, называемая электродвижущей силой взаимной индукции.

Величина электродвижущей силы взаимной индукции во второй катушке пропорциональна скорости изменения потока, сцепленного с витками этой катушки, т. е.

$$e_2 = - \frac{\Delta \psi_{1,2}}{\Delta t}, \quad (163)$$

где e_2 — электродвижущая сила взаимной индукции во вторичной катушке;

$\Delta \psi_{1,2}$ — приращение потока, сцепленного с витками вторичной катушки, за элементарный отрезок времени Δt .

Но, как известно,

$$\psi_{1,2} = Mi_1,$$

где M — взаимная индуктивность катушек; поэтому формуле (163) можно придать такой вид:

$$e_2 = -M \frac{\Delta i_1}{\Delta t}, \quad (164)$$

т. е. индуцированная электродвижущая сила взаимной индукции во вторичной катушке пропорциональна скорости изменения тока в первичной катушке.

Следовательно, чем быстрее изменяется ток в первичной катушке, тем больше величина электродвижущей силы взаимной индукции во вторичной катушке.

На основании формулы (164) можно дать такое определение единице измерения взаимной индуктивности — 1 генри. Две катушки обладают взаимной индуктивностью в 1 генри, если при равномерном изменении тока в одной из них на 1 ампер в 1 секунду в другой катушке индуцируется электродвижущая сила взаимной индукции в 1 вольт.

Знак минус, стоящий в формуле (164), отображает собой известное правило Ленца, которое в данном случае можно сформулировать так: индуцированная электродвижущая сила взаимной индукции во вторичной катушке всегда имеет такое направление, при котором электромагнитные процессы, создаваемые ею, противодействуют всем изменениям тока первичной катушки, а следовательно, и изменениям магнитного потока, создаваемого им. Если, например, вторичная цепь замкнута, то электродвижущая сила взаимной индукции создает в ней переменный ток i_2 , который в свою очередь создает свой собственный магнитный поток, действующий навстречу потоку, создаваемому током первичной катушки.

§ 92. ВЗАИМНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ ДВУХ КАТУШЕК

Определим взаимную индуктивность двух катушек, размещенных на тороидальном (кольцевом) сердечнике (рис. 168).

Допустим, что по первичной катушке, имеющей число витков w_1 , течет постоянный ток I_1 . Полагаем также, что весь магнитный поток Φ_1 , создаваемый током I_1 , целиком пронизывает витки w_2 вторичной катушки.

Магнитный поток Φ_1 , создаваемый током I_1 первичной катушки, равен

$$\Phi_1 = \frac{w_1 I_1 \mu S}{l},$$

где Φ_1 — магнитный поток в первичной катушке в вольт-секундах;

I_1 — ток в первичной катушке в амперах;
 μ — магнитная проницаемость тороидального сердечника в генри на метр;

$$\mu = \mu_r \mu_0 = \mu_r \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{2H}{M};$$

l — длина средней магнитной силовой линии в сердечнике катушек в метрах;
 S — площадь поперечного сечения сердечника в квадратных метрах.

Поток $\Phi_{1,2}$, сцепленный с витками вторичной катушки, в этом случае равен

$$\Phi_{1,2} = \omega_2 \Phi_1 = \frac{\omega_1 \omega_2 I_1 \mu S}{l}.$$

Отсюда находим взаимную индуктивность катушек по формуле

$$M = \frac{\Phi_{1,2}}{I_1},$$

или

$$M = \frac{\omega_1 \omega_2 \mu S}{l}, \quad (165)$$

где M — взаимная индуктивность в генри.

Пример 93. Две катушки с числом витков $\omega_1 = 200$ и $\omega_2 = 300$ размещены на тороидальном сердечнике (рис. 168). Определить взаимную индуктивность этих катушек, если длина средней магнитной линии в системе катушек $l = 0,628$ м, площадь поперечного сечения тора катушек $S = 10 \cdot 10^{-4}$ м² и относительная магнитная проницаемость сердечника катушки $\mu_r = 1$.

Решение. По формуле (165) находим

$$M = \frac{\mu_r \mu_0 \omega_1 \omega_2 S}{l} = \frac{1 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 200 \cdot 300 \cdot 10 \cdot 10^{-4}}{10^7 \cdot 0,628} = 12 \cdot 10^{-5} \text{ гн.}$$

Теперь выясним соотношение между индуктивностями двух индуктивно связанных катушек (рис. 168) и их взаимной индуктивностью.

Как известно, первичная катушка имеет индуктивность, равную

$$L_1 = \frac{\omega_1^2 \mu S}{l},$$

индуктивность второй катушки равна

$$L_2 = \frac{\omega_2^2 \mu S}{l}.$$

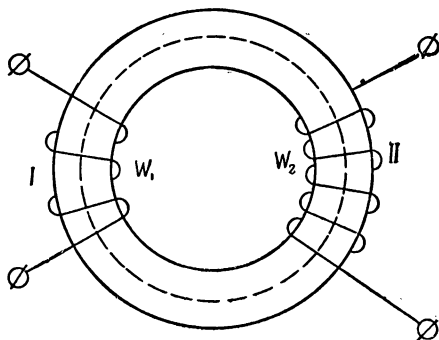


Рис. 168. Две катушки, расположенные на тороидальном сердечнике, индуктивно связаны друг с другом

Перемножив последние два равенства, получим

$$L_1 L_2 = \frac{w_1^2 w_2^2 \mu^2 S^2}{l^2}.$$

Извлекая корень квадратный из полученного выражения, находим, что

$$\sqrt{L_1 L_2} = \frac{w_1 w_2 \mu S}{l} = M,$$

т. е. взаимная индуктивность двух катушек при отсутствии магнитного рассеяния в их магнитной цепи равна корню квадратному из произведения величин индуктивностей этих катушек.

Однако при наличии магнитного рассеяния

$$\sqrt{L_1 L_2} > M$$

и в общем случае

$$M = k \sqrt{L_1 L_2}, \quad (166)$$

где k — так называемый коэффициент связи двух индуктивно связанных катушек, величина которого может изменяться от нуля до единицы:

$$0 \leq k \leq 1.$$

Пример 94. Определить коэффициент связи двух катушек, если их индуктивности соответственно равны $L_1 = 0,01$ гн и $L_2 = 0,09$ гн, а их взаимная индуктивность $M = 0,024$ гн.

Решение. По формуле (166) находим

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{0,024}{\sqrt{0,01 \cdot 0,09}} = \frac{0,024}{0,03} = 0,8.$$

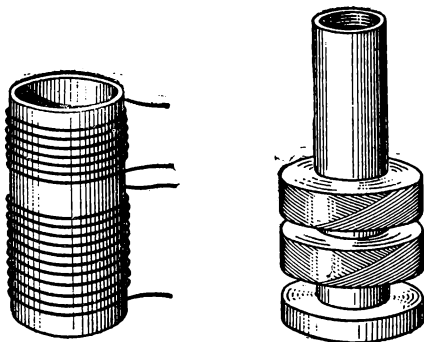


Рис. 169. Воздушный трансформатор высокой частоты

Индуктивно связанные катушки широко применяются в электротехнике, и в частности в технике связи, в виде трансформаторов, индукционных катушек, вариметров и т. д.

На рис. 169 показана система двух индуктивно связанных катушек, посаженных на один цилиндрический каркас, применяемая в качестве воздушного трансформатора высокой частоты в радиотехнике.

§ 93. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

Если несколько катушек индуктивности соединены последовательно и так, что они друг на друга индуктивного влияния не оказывают (рис. 170), то общая индуктивность всей цепи равна сумме индуктивностей отдельных катушек:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n. \quad (167)$$

При параллельном соединении катушек, не связанных индуктивно друг с другом (рис. 171), общая индуктивность определяется формулой

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}. \quad (168)$$

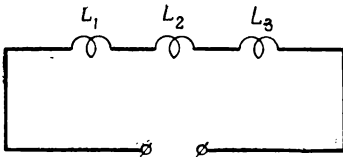


Рис. 170. Последовательное соединение катушек индуктивности

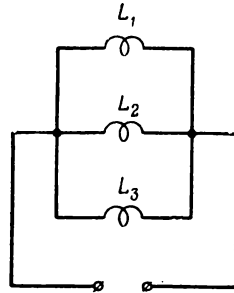


Рис. 171. Параллельное соединение катушек индуктивности

Пример 95. Три катушки с индуктивностями $L_1 = 0,3$ гн, $L_2 = 0,6$ гн и $L_3 = 0,8$ гн соединены параллельно. Определить общую индуктивность всей цепи, если катушки не связаны индуктивно друг с другом.

Решение. По формуле (168) находим

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} = \frac{1}{0,3} + \frac{1}{0,6} + \frac{1}{0,8} = \frac{25}{4},$$

откуда

$$L = \frac{4}{25} = 0,16 \text{ гн.}$$

Если катушки индуктивности соединены последовательно и индуктивно связаны друг с другом, то их общая индуктивность определяется по формуле

$$L = L_1 + L_2 \pm 2M, \quad (169)$$

где L — общая индуктивность катушек;
 L_1 и L_2 — индуктивности отдельных катушек;
 M — взаимная индуктивность катушек.

Знак плюс, стоящий перед величиной $2M$, относится к согласному включению катушек, т. е. к тому случаю, когда собственный магнитный поток в каждой катушке совпадает с направлением магнитного потока другой катушки, пронизывающего ее. Если же эти потоки направлены навстречу друг другу, т. е. катушки включены встречно, то перед величиной $2M$ ставится знак минус.

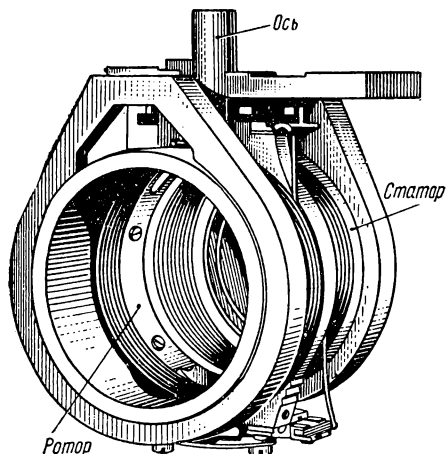


Рис. 172. Вариометр

На рис. 172 изображен прибор, называемый вариометром, дающий возможность плавно изменять общую индуктивность двух его катушек, соединенных последовательно, путем изменения их взаимной индуктивности. Поворачивая подвижную катушку внутри неподвижной, можно плавно изменять коэффициент взаимной индукции катушек. Когда катушки расположены параллельно друг другу, их индуктивное взаимодействие бывает наибольшим; когда

они расположены своими плоскостями под прямым углом, их индуктивное взаимодействие равно нулю. Если направления токов в катушках при параллельном расположении последних одинаковы, то общая индуктивность вариометра максимальна:

$$L = L_1 + L_2 + 2M,$$

а если токи имеют различные направления, то общая индуктивность вариометра минимальна:

$$L = L_1 + L_2 - 2M.$$

Пример 96. Определить, в каких пределах изменяется общая индуктивность вариометра, если индуктивности его катушек соответственно равны $L_1 = 8 \cdot 10^{-5}$ гн и $L_2 = 2 \cdot 10^{-5}$ гн и максимальный коэффициент связи катушек $k = 0,6$.

Решение. Определяем взаимную индуктивность катушек по формуле (166):

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} = 0,6 \sqrt{8 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^{-5}} = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ гн.}$$

Максимальное значение индуктивности

$$\begin{aligned} L &= L_1 + L_2 + 2M = 8 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 2,4 \cdot 10^{-5} = \\ &= 14,8 \cdot 10^{-5} \text{ гн.} \end{aligned}$$

Минимальное значение индуктивности.

$$L = L_1 + L_2 - 2M = 8 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 2,4 \cdot 10^{-5} = 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ гн.}$$

§ 94. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Магнитное поле, как некоторый вид материи, обладает энергией.

Энергия магнитного поля распределена во всем объеме этого поля с некоторой конечной плотностью, пропорциональной квадрату напряженности магнитного поля:

$$W_0 = \frac{\mu_r \mu_0 H^2}{2}, \quad (170)$$

где W_0 — объемная плотность энергии магнитного поля в джоулях на кубический метр;

H — напряженность магнитного поля в амперах на метр;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{гн}}{\text{м}}$ — магнитная проницаемость вакуума;

μ_r — относительная магнитная проницаемость среды, где распределено магнитное поле.

Если известно распределение объемной плотности энергии магнитного поля, то можно определить энергию всего поля путем суммирования ее по отдельным элементарным объемам, что, обычно выполняется приемами высшей математики. Ограничимся подсчетом энергии магнитного поля для простейшего случая, когда оно однородно. В этом случае энергия магнитного поля во всем ее объеме распределена с одинаковой плотностью и может быть определена по формуле

$$W = W_0 V, \quad (171)$$

где W — энергия магнитного поля в джоулях;

W_0 — объемная плотность энергии в джоулях на кубический метр;

V — объем, занимаемый магнитным полем, в кубических метрах.

Пример 97. Требуется определить энергию, запасенную в магнитном поле весьма длинной цилиндрической катушки, если длина катушки $l = 1,5 \text{ м}$, площадь поперечного сечения цилиндрического каркаса катушки $S = 10 \text{ кв. см}$, число витков катушки $w = 150$ и величина тока в обмотке катушки $I = 2 \text{ а}$. Сердечник катушки сделан из материала, относительная магнитная проницаемость которого $\mu_r = 1$.

Решение. Так как катушка относительно длинная (длиннее диаметра каркаса в несколько десятков раз), то можно считать, что магнитное поле внутри катушки однородно и вся энергия его практически сосредоточена внутри самой катушки.

Напряженность магнитного поля катушки согласно формуле (110) равна

$$H = \frac{wl}{l} = \frac{150 \cdot 2}{1,5} = 200 \frac{\text{а}}{\text{м}}.$$

Объемная плотность энергии магнитного поля в катушке равна

$$W_0 = \frac{\mu_r \mu_0 H^2}{2} = \frac{1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 200^2}{2} = 25,12 \cdot 10^{-3} \frac{\text{дж}}{\text{м}^3}.$$

Объем, занимаемый магнитным полем внутри катушки,

$$V = Sl = 10 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Магнитное поле катушки обладает энергией

$$W = W_0 V = 25,12 \cdot 10^{-3} \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ дж}.$$

Энергию магнитного поля катушки можно определить, исходя из величины индуктивности L катушки и тока I в ней.

Согласно формуле (171) энергия однородного магнитного поля катушки равна

$$W = W_0 V,$$

где

$$W_0 = \frac{\mu_r \mu_0 H^2}{2}; \quad H = \frac{\omega I}{l} \quad \text{и} \quad V = Sl.$$

Принимая во внимание последние соотношения, можно написать, что

$$W = W_0 V = \frac{\mu_r \mu_0 H^2}{2} Sl = \frac{\mu_r \mu_0 \omega^2 I^2}{2} Sl,$$

или

$$W = \frac{\mu_r \mu_0 \omega^2 S}{l} \cdot \frac{I^2}{2}.$$

Но, как известно,

$$\frac{\mu_r \mu_0 \omega^2 S}{l} = L.$$

Следовательно, выражению для определения энергии магнитного поля катушки можно придать такой вид:

$$W = \frac{LI^2}{2}, \quad (172)$$

где W — энергия магнитного поля катушки в джоулях;

L — индуктивность катушки в генри;

I — величина тока в обмотке катушки в амперах.

Пример 98. Определить энергию магнитного поля катушки, если ее индуктивность $L = 0,005 \text{ гн}$, а ток, протекающий в ее обмотке, $I = 2 \text{ а}$.

Решение. Применяя формулу (172), находим

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{0,005 \cdot 2^2}{2} = 0,01 \text{ дж}.$$

Формуле (172) можно придать несколько иной вид, выразив ее через ток I и магнитный поток Φ , пронизывающий катушку.

Как известно,

$$L = \frac{w\Phi}{I} = \frac{\psi}{I},$$

а поэтому

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{\psi I^2}{I \cdot 2} = \frac{\psi I}{2}, \quad (173)$$

где ψ — число потокоцеплений в катушке в вольт-секундах;

I — ток в катушке в амперах;

W — энергия магнитного поля в катушке в джоулях.

Пример 99. Определить энергию магнитного поля катушки, если число потокоцеплений в катушке $\psi = 8 \cdot 10^{-4}$ в-сек, а ток в ней $I = 5$ а.

Решение. Применяя формулу (173), находим

$$W = \frac{\psi I}{2} = \frac{8 \cdot 10^{-4} \cdot 5}{2} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ дж.}$$

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ПЕРЕМЕННЫЕ ТОКИ

ГЛАВА XIX

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 95. ОБЩЕЕ ПОНЯТИЕ О ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Переменным током называется такой электрический ток, который с течением времени изменяется по величине и направлению или, в частном случае, изменяется по величине, сохраняя свое направление в цепи неизменным.

Так как переменный ток в общем случае меняется в цепи не только по величине, но и по направлению, то обычно одно из направлений переменного тока в цепи считают условно положительным, а другое, противоположное первому, — отрицательным. В соответствии с этим и величину переменного тока в первом случае считают положительной, а во втором — отрицательной. Следовательно, можно сказать, что переменный ток — величина алгебраическая; знак его определяется тем, в каком направлении в рассматриваемый момент времени протекает переменный ток в цепи — в положительном или отрицательном.

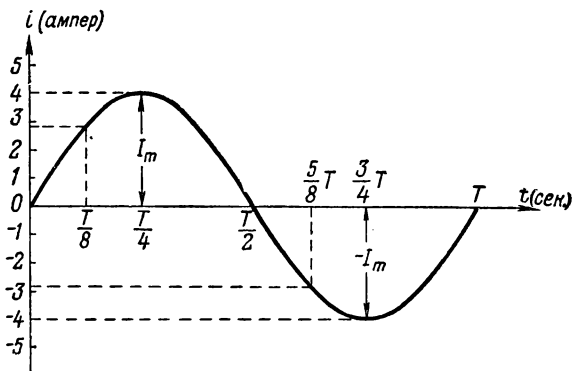


Рис. 173. Развернутая диаграмма переменного синусоидального тока

Величина переменного тока, соответствующая данному моменту времени, называется **мгновенным значением переменного тока**.

Максимальное мгновенное значение переменного тока, которого он достигает в процессе своего изменения, называется **амплитудой тока**.

График зависимости переменного тока от времени называется **развернутой диаграммой переменного тока**. На рис. 173 приведена развернутая диаграмма переменного тока, изменяющегося с течением времени по величине и направлению. По горизонтальной оси Ot отложены в определенном масштабе отрезки времени, а по вертикальной оси — величины тока: вверх от начальной точки O — положительные, а вниз — отрицательные. Следовательно, часть развернутой диаграммы тока, расположенная выше оси времени Ot , характеризует изменение положительных величин тока во времени, а часть, расположенная ниже оси времени Ot , — изменение отрицательных величин. Из диаграммы видно, что в момент времени $t = 0$ ток равен нулю ($i = 0$). Затем он с течением времени растет в положительном направлении, в момент времени $t = \frac{T}{4}$ достигает максимального значения, после чего убывает по величине и в момент времени $t = \frac{T}{2}$ становится равным нулю. Затем, пройдя через нулевое значение, ток меняет свой знак на противоположный, т. е. становится отрицательным, растет по абсолютной величине, достигает максимума при $t = \frac{3}{4}T$, после чего убывает и при $t = T$ становится равным нулю.

Развернутая диаграмма переменного тока дает наглядное представление о том, как изменяется величина данного переменного тока во времени, и, кроме того, дает возможность определить значение тока для любого заданного момента времени, не прибегая к математическим вычислениям. Например, из развернутой диаграммы, приведенной на рис. 173, видно, что в момент времени $t = \frac{T}{8}$ ток $i = 2,8 a$, в момент $t = \frac{T}{4}$ ток $i = 4 a$, в момент $t = \frac{5}{8} T$ ток $i = -2,8 a$ и т. д.

§ 96. НЕКОТОРЫЕ ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Периодическим переменным током называется такой электрический ток, который через равные промежутки времени повторяет полный цикл своих изменений, возвращаясь к своей исходной величине.

На рис. 174 приведена развернутая диаграмма периодического переменного тока. Здесь мы видим, что через равные проме-

жутки времени T график тока воспроизводится полностью без каких-либо изменений.

Время T , в течение которого переменный периодический ток совершает полный цикл своих изменений, возвращаясь к своей исходной величине, называется **периодом** переменного тока.

Величина, обратная периоду, называется **частотой** переменного тока:

$$f = \frac{1}{T}, \quad (174)$$

где f — частота переменного тока;
 T — период переменного тока.

Если в формуле (174) выразить время T в секундах, то будем иметь:

$$f = \frac{1}{T} \left(\frac{1}{\text{сек}} \right),$$

т. е. размерность частоты переменного тока выражается в $\frac{1}{\text{сек}}$.

Частота переменного тока численно равна числу периодов в секунду.

За единицу измерения частоты переменного тока принят 1 герц (1 гц, 1 Hz).

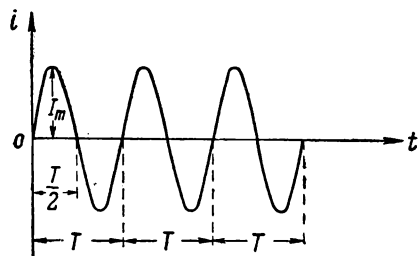


Рис. 174. Развернутая диаграмма периодического переменного тока

Частота переменного тока равна одному герцу, если период этого тока равен одной секунде.

В табл. 33 приведены единицы измерения частоты переменного тока с указанием их условных обозначений и соотношения с основной единицей.

Таблица 33

Единицы измерения частоты переменного тока

Наименование величины и ее обозначение	Название единицы	Обозначение		Соотношение с основной величиной
		русское	международное	
Частота f	{	герц	Hz	—
		килогерц	kHz	10^3 гц
		мегагерц	MHz	10^6 гц
		гигагерц	GHz	10^9 гц
		гц		
		кгц		
		мггц		
		ггц		

За стандартную частоту переменного тока в силовоточной электротехнике принята частота $f = 50$ гц. В технике связи применяются частоты более высокие, и в частности в радиотехнике — порядка миллионов и миллиардов герц.

§ 97. ПЕРЕМЕННЫЙ СИНУСОИДАЛЬНЫЙ ТОК

Исключительно важную роль в электротехнике играют синусоидальные переменные токи.

Синусоидальным током называется периодический переменный ток, который с течением времени изменяется по закону синуса.

Синусоидальный ток — элементарный, т. е. его уже нельзя разложить на другие, более простые переменные токи. Наоборот, всякие сложные периодические токи можно разложить на ряд синусоидальных токов, что мы увидим далее, при изучении сложных переменных токов.

Так как синусоидальный переменный ток — элементарный, т. е. наиболее простой, то естественно, что изложение теории переменных токов обычно начинается с синусоидального переменного тока.

В простейшем случае переменный синусоидальный ток математически выражается формулой

$$i = I_m \cdot \sin \omega t, \quad (175)$$

где I_m — амплитуда синусоидального тока.

Переменная величина ωt в этом выражении обозначает некоторый угол, называемый **фазой синусоидального тока**. Фаза ωt изменяется пропорционально времени t .

Множитель ω , входящий в выражение фазы ωt , — величина постоянная, называемая **угловой частотой синусоидального тока**.

Угловая частота ω синусоидального тока зависит от частоты f этого тока и определяется формулой

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \quad (176)$$

где ω — угловая частота синусоидального тока;

f — частота синусоидального тока;

T — период синусоидального тока;

2π — центральный угол окружности, выраженный в радианах.

Исходя из формулы (176), можно определить размерность угловой частоты:

$$[\omega] = \left[\frac{2\pi}{T} \right] = \frac{1}{\text{сек}}, \quad (177)$$

так как 2π — угол в радианах — является безразмерной величиной.

В соответствии с этим фаза ωt синусоидального тока измеряется радианами.

Напомним, что 1 радиан = $57^{\circ}17'$, угол $90^{\circ} = \frac{\pi}{2}$ радиан, $180^{\circ} = \pi$ радиан, $270^{\circ} = \frac{3\pi}{2}$ радиан и $360^{\circ} = 2\pi$ радиан, где $\pi = 3,14$ радиан.

Зная амплитуду тока I_m , а также угловую частоту ω , можно определить мгновенное значение переменного синусоидального тока для любого момента времени, пользуясь формулой (175).

Пример 100. Требуется определить мгновенное значение переменного синусоидального тока $i = I_m \cdot \sin \omega t$, если известно, что $I_m = 12$ а, частота $f = 50$ гц, а время $t = 0,0025$ сек.

Решение. Угловая частота тока

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Фаза тока

$$\omega t = 314 \cdot 0,0025 = 0,785 \text{ рад.} = \frac{0,785 \cdot 180^{\circ}}{\pi} = 45^{\circ}.$$

Мгновенное значение тока

$$i = 12 \cdot \sin 45^{\circ} = 12 \cdot 0,707 = 7,484 \text{ а.}$$

Зная мгновенное значение синусоидального тока, можно построить его развернутую диаграмму, т. е. нарисовать график зависимости тока от времени t или от угла ωt , величина которого изменяется пропорционально времени. На рис. 175, а приведена векторная диаграмма синусоидального тока, выражающая зависимость тока от времени t , а на рис. 175, б — векторная диаграмма, выражающая зависимость этого тока от угла ωt . В последнем случае мы видим, что периоду T соответствует угол 2π , половине периода $\frac{T}{2}$ — угол π и т. д.

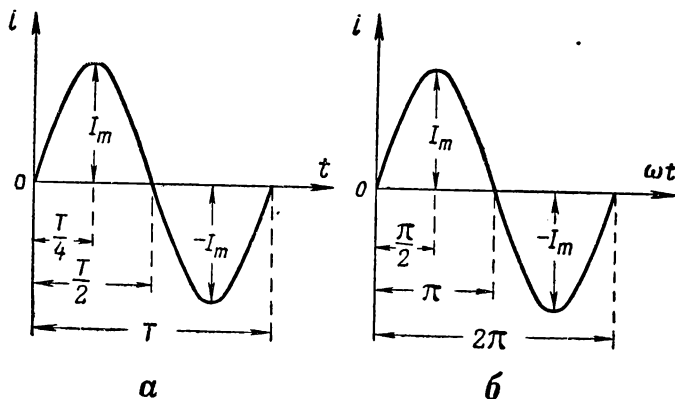


Рис. 175. Развернутые диаграммы синусоидального тока:
а — зависимость тока от времени; б — зависимость тока от угла ωt

В общем случае может оказаться, что в момент времени $t = 0$, с которого мы начинаем наблюдение за изменением переменного синусоидального тока, мгновенное значение этого тока не равно нулю. Формула для определения мгновенного значения переменного синусоидального тока в этом случае принимает следующий вид:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi), \quad (178)$$

где $(\omega t + \psi)$ — фаза переменного синусоидального тока;
 ψ — угол, называемый начальной фазой переменного синусоидального тока.

Если в формуле (178) положить $t = 0$, то будем иметь

$$\omega t = 0, \quad \omega t + \psi = \psi \quad \text{и} \quad i_{t=0} = I_m \sin \psi.$$

Следовательно, начальная фаза — это фаза синусоидального тока в момент времени $t = 0$.

Пример 101. Известно, что амплитуда переменного синусоидального тока $I_m = 8$ а, а начальная фаза его $\psi = 30^\circ$. Требуется определить мгновенное значение этого тока в момент времени $t = 0$.

Решение. Применяя формулу (178), находим

$$i_{t=0} = I_m \cdot \sin \psi = 8 \cdot \sin 30^\circ = 8 \cdot 0,5 = 4 \text{ а.}$$

Начальная фаза переменного синусоидального тока может быть положительной ($\psi > 0$) или отрицательной ($\psi < 0$) величиной. В первом случае мгновенное значение синусоидального тока в момент времени $t = 0$ положительно, а во втором — отрицательно.

На рис. 176 показана развернутая диаграмма переменного синусоидального тока, имеющего начальную фазу $\psi = \frac{\pi}{2}$, т. е. тока, определяемого по формуле $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$. Мгновенное значение его в момент времени $t = 0$ равно

$$i_{t=0} = I_m \cdot \sin \frac{\pi}{2} = I_m$$

т. е. равно положительной амплитуде тока.

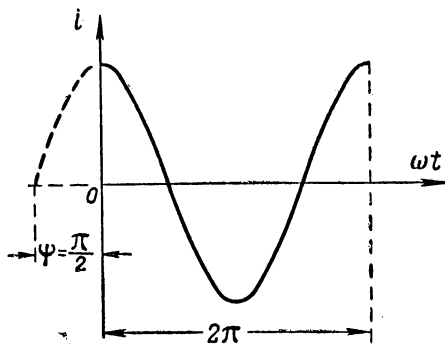


Рис. 176. Развернутая диаграмма синусоидального тока

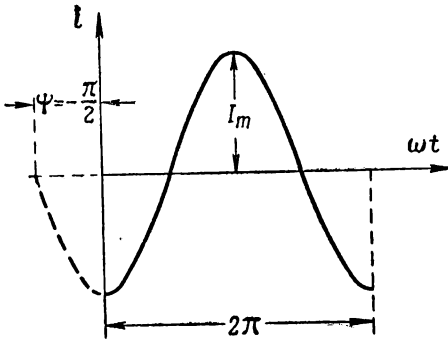


Рис. 177. Развернутая диаграмма синусоидального тока

На рис. 177 представлена развернутая диаграмма переменного синусоидального тока, имеющего начальную фазу $\psi = -\frac{\pi}{2}$, т. е. тока, определяемого по формуле

$$i = I_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Мгновенное значение этого тока в момент времени $t = 0$ равно

$$i_{t=0} = I_m \cdot \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -I_m$$

т. е. оно равно отрицательной амплитуде тока.

Два переменных синусоидальных тока совпадают по фазе, если они имеют одинаковые фазы и, следовательно, одновременно достигают своих нулевых и максимальных значений одинакового знака. Например, токи $i_1 = I_{1m} \cdot \sin \omega t$ и $i_2 = I_{2m} \cdot \sin \omega t$ совпадают по фазе. На рис. 178 представлены развернутые диаграммы этих токов.

Два переменных синусоидальных тока сдвинуты по фазе относительно друг друга, если они имеют различные фазы. Например, токи $i_1 = I_{1m} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ и $i_2 = I_{2m} \cdot \sin \omega t$ сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол $\frac{\pi}{2}$, так как

$$\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - \omega t = \frac{\pi}{2}.$$

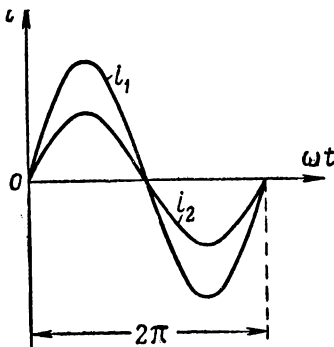


Рис. 178. Два синусоидальных тока совпадают по фазе друг с другом

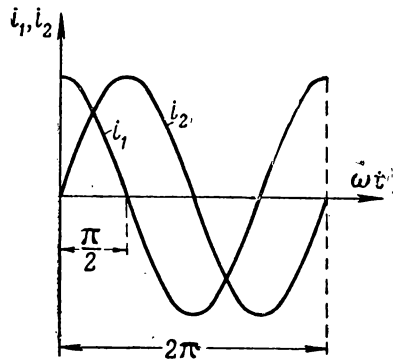


Рис. 179. Синусоидальные токи сдвинуты по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$

В этом случае ток i_1 в своих изменениях опережает по фазе ток i_2 на угол $\frac{\pi}{2}$, или, иначе, ток i_2 отстает по фазе относительно тока i_1 на угол $\frac{\pi}{2}$. На рис. 179 представлены развернутые диаграммы двух переменных токов, сдвинутых по фазе относительно друг друга на угол $\frac{\pi}{2}$.

§ 98. ПРОСТЕЙШИЙ СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ СИНУСОИДАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

Переменный синусоидальный ток может проходить в такой электрической цепи, где действует синусоидальная электродвижущая сила.

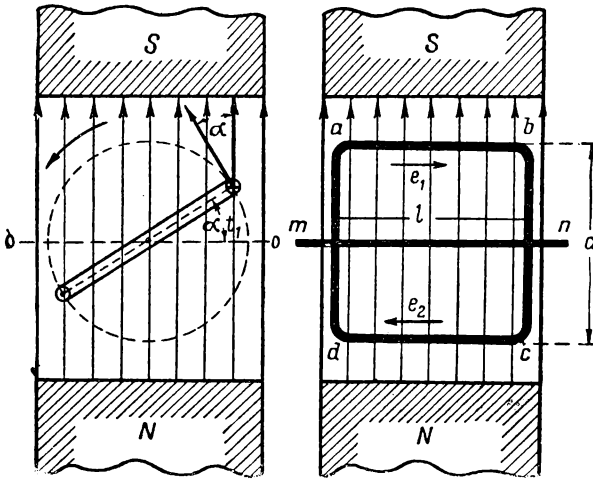


Рис. 180. Контур $abcd$ вращается вокруг своей оси mn с равномерной скоростью в однородном магнитном поле

Рассмотрим простейший способ получения переменной синусоидальной электродвижущей силы.

Допустим, что в однородном магнитном поле (рис. 180) вращается вокруг своей оси mn прямоугольный контур $abcd$. Движение его совершается с равномерной угловой скоростью ω в направлении против движения часовой стрелки, как это показано стрелкой на левой стороне рис. 180. Стороны ab и cd , равные порознь l , являются активными сторонами контура, так как они при своем движении в магнитном поле пересекают магнитные линии и в них индуцируется электродвижущая сила. Другие две стороны, bc и da , контура, равные порознь a , — не активные, так как

они при своем движении в магнитном поле скользят вдоль магнитных линий и в них электродвижущая сила не индуцируется.

Назовем положение контура $abcd$ в магнитном поле нейтральным, когда он своей плоскостью расположен перпендикулярно магнитным линиям, а плоскость OO , в которой он находится в этот момент времени, назовем нейтральной плоскостью.

Активные стороны ab и cd контура, перемещаясь по окружности радиусом $\frac{a}{2}$, пересекают магнитные линии под некоторым углом α , изменяющимся с поворотом контура. Величина α в любой момент времени равна углу ωt поворота контура относительно нейтральной плоскости, так как эти углы имеют взаимно перпендикулярные стороны. Сам же угол ωt при вращении контура изменяется пропорционально времени t , так как угловая скорость ω вращения контура по условию постоянна ($\omega = \text{const}$).

В каждой из активных сторон ab и bc контура индуцируется электродвижущая сила, величину которой можно определить по формуле

$$e_1 = Blv \cdot \sin \omega t \text{ и } e_2 = Blv \cdot \sin (\omega t + \pi) = -Blv \cdot \sin \omega t,$$

где e_1 и e_2 — мгновенные значения электродвижущих сил, индуцированных соответственно в активных сторонах ab и cd контура $abcd$, в вольтах;

B — магнитная индукция магнитного поля в вольт-секундах на квадратный метр;

l — длина каждой из активных сторон ab и cd контура в метрах;

v — линейная скорость движения активных сторон контура по окружности радиусом $\frac{a}{2}$ в метрах в секунду;

ωt и $\omega t + \pi$ — углы, под которыми активные стороны контура пересекают магнитные линии.

Так как электродвижущие силы, индуцированные в активных сторонах контура, действуют согласно друг с другом, что отмечено стрелками на правой стороне рис. 180, то результирующая электродвижущая сила, индуцируемая в контуре, будет равна

$$e = 2Blv \cdot \sin \omega t, \quad (179)$$

т. е. индуцированная электродвижущая сила в контуре изменяется по синусоидальному закону.

Следовательно, если контур вращается в однородном магнитном поле с равномерной угловой скоростью, то в нем индуцируется синусоидальная электродвижущая сила.

Преобразуем формулу (179), выразив ее через максимальный магнитный поток Φ_m , пронизывающий контур $abcd$.

Линейная скорость v активных сторон ab и cd контура $abcd$

равна произведению радиуса вращения $\frac{a}{2}$ контура на угловую скорость ω , т. е. $v = \frac{a}{2} \omega$. Подставив данное выражение для v в формулу (179), получим

$$e = 2Bl \frac{a}{2} \omega \cdot \sin \omega t.$$

Но $la = S$, где S — площадь контура $abcd$, и, следовательно, $Bla = BS = \Phi_m$, где Φ_m — максимальный магнитный поток, пронизывающий контур $abcd$.

В соответствии с этим последняя формула приобретает следующий вид:

$$e = \omega \Phi_m \cdot \sin \omega t, \quad (180)$$

где $\omega \Phi_m$ — амплитуда синусоидальной электродвижущей силы;
 ωt — фаза синусоидальной электродвижущей силы;
 ω — угловая частота синусоидальной электродвижущей силы, в данном случае равная угловой скорости вращения контура в магнитном поле.

Если в однородном магнитном поле будет вращаться с равномерной скоростью рамка, имеющая ω витков, то индуцированная электродвижущая сила в ней будет в ω раз больше, чем в контуре, имеющем только один виток, т. е. в этом случае электродвижущая сила, индуцированная в рамке, будет равна

$$e = \omega \omega \Phi_m \cdot \sin \omega t. \quad (181)$$

Пример 102. В однородном магнитном поле, магнитная индукция которого $B = 0,8 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$, вращается квадратной формы рамка, каждая сторона которой $l = 0,5$ м. Определить электродвижущую силу, индуцированную в рамке, если рамка имеет число витков $\omega = 50$ и вращается со скоростью $n = 1500$ об/мин.

Решение. Площадь рамки

$$S = l^2 = 0,5^2 = 0,25 \text{ м}^2.$$

Максимальный магнитный поток, пронизывающий рамку,

$$\Phi_m = BS = 0,8 \cdot 0,25 = 0,2 \text{ в-сек.}$$

Угловая частота, в данном случае равная угловой скорости вращения рамки, равна

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Электродвижущая сила в рамке

$$e = \omega \omega \Phi_m \cdot \sin \omega t = 50 \cdot 157 \cdot 0,2 \cdot \sin 157 t,$$

или

$$e = 1570 \cdot \sin 157 t \text{ вольт.}$$

§ 99. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

При расчете цепей переменного тока приходится производить сложение и вычитание синусоидальных токов или электродвижущих сил, имеющих одинаковую частоту, но в общем случае различные амплитуды и начальные фазы. Решение подобных задач значительно облегчается, если применить метод векторных диаграмм, основанный на изображении синусоидального тока или электродвижущей силы с помощью вращающихся векторов.

Возьмем прямоугольную систему осей MON (рис. 181). Ось OM , расположенную по горизонтальному направлению вправо от точки O , назовем начальной осью, так как от нее мы будем отсчитывать углы поворота векторов тока и электродвижущей силы. При этом условимся откладывать положительные углы от оси OM в направлении, противоположном направлению вращения часовой стрелки, а отрицательные углы — по часовой стрелке.

Теперь предположим, что задан синусоидальный ток, мгновенное значение которого определяется формулой $i = I_m \cdot \sin \omega t$. Зададимся некоторым произвольным масштабом тока и в этом масштабе представим амплитуду заданного тока I_m в виде некоторого отрезка прямой, который обозначим в виде вектора тока I_m . Совместим начало вектора тока I_m с точкой O пересечения осей OM и NN' на рис. 181, а сам вектор тока I_m расположим вправо от точки O по оси OM . Так как вектор тока I_m смещен по направлению с осью, то угол между ними равен нулю.

Теперь допустим, что в момент времени $t = 0$ вектор тока начал вращаться вокруг точки O в направлении против движения часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ω . Спустя время t_1 вектор тока I_m займет положение на плоскости, определяемое углом ωt_1 поворота его относительно начальной оси OM (начала отсчета углов). Этот угол легко определить, если известны угловая скорость ω вращения вектора тока I_m и фиксированное время t_1 .

Если из конца вектора тока I_m опустить перпен-

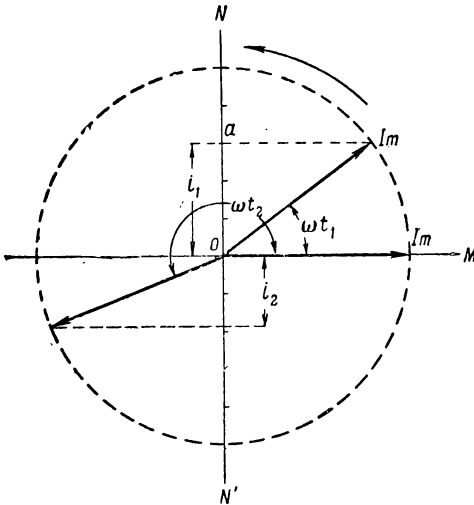


Рис. 181. Векторная диаграмма синусоидального тока $i = I_m \cdot \sin \omega t$

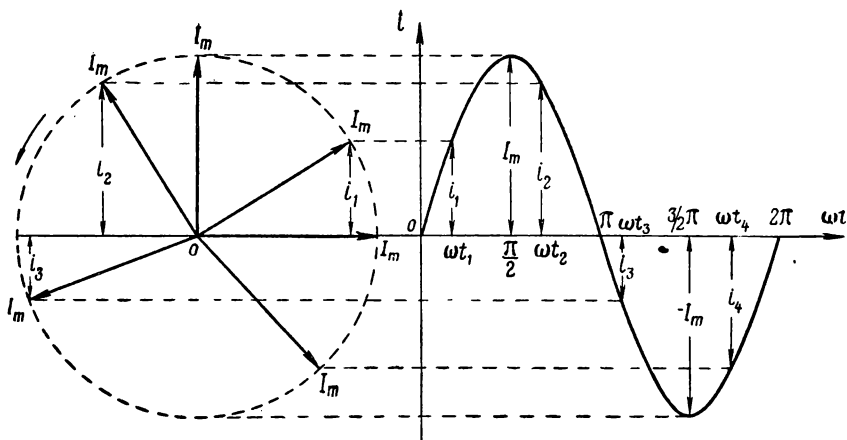


Рис. 182. Векторная и развернутая диаграммы синусоидального переменного тока $i = I_m \cdot \sin \omega t$

дикуляр на вертикальную ось ON , то он на этой оси отсечет отрезок Oa , равный проекции вектора I_m на эту ось. Из прямоугольного треугольника $OI_m a$ находим, что

$$Oa = I_m \cdot \sin \omega t_1.$$

Но, как известно, $I_m \cdot \sin \omega t_1$ есть мгновенное значение заданного синусоидального тока, соответствующее моменту времени t_1 . А это значит, что отрезок Oa (проекция вектора тока I_m на вертикальную ось NN') пропорционален мгновенному значению тока i . Следовательно, если заранее нанести на вертикальную ось NN' масштаб тока, то можно определить мгновенное значение тока для момента времени t_1 , а также для любого другого момента времени (t_2 , t_3 и т. д.).

Графическое изображение синусоидального тока с помощью вращающегося вектора тока I_m называется векторной диаграммой этого тока.

Пользуясь векторной диаграммой тока I_m , легко построить его развернутую диаграмму. На рис. 182 показан метод построения развернутой диаграммы переменного синусоидального тока по его векторной диаграмме. Здесь слева изображена векторная диаграмма тока I_m , а справа — его развернутая диаграмма $i = I_m \cdot \sin \omega t$.

Если начальная фаза синусоидального тока отлична от нуля, например $\psi > 0$, то в момент времени $t = 0$ вектор тока I_m занимает на векторной диаграмме положение под углом ψ к начальной оси. На рис. 183 показана векторная диаграмма тока $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$.

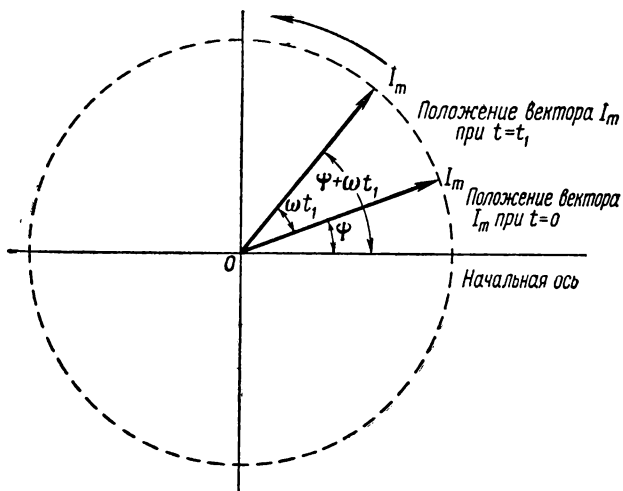


Рис. 183. Векторная диаграмма синусоидального тока
 $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi)$

Если начальная фаза синусоидального тока отрицательна, т. е. $\psi < 0$, то в момент времени $t = 0$ вектор тока I_m занимает на векторной диаграмме положение под углом $-\psi$ к начальной оси. На рис. 184 показана векторная диаграмма тока $i = I_m \cdot \sin(\omega t - \psi)$.

Теперь посмотрим, как осуществляется сложение и вычитание синусоидальных токов с помощью векторных диаграмм.

Допустим, что требуется сложить два синусоидальных тока одинаковой частоты: $i_1 = I_{1m} \cdot \sin(\omega t + \psi_1)$ и $i_2 = I_{2m} \cdot \sin(\omega t + \psi_2)$. Так как эти токи имеют одинаковую частоту, то их векторы I_{1m}

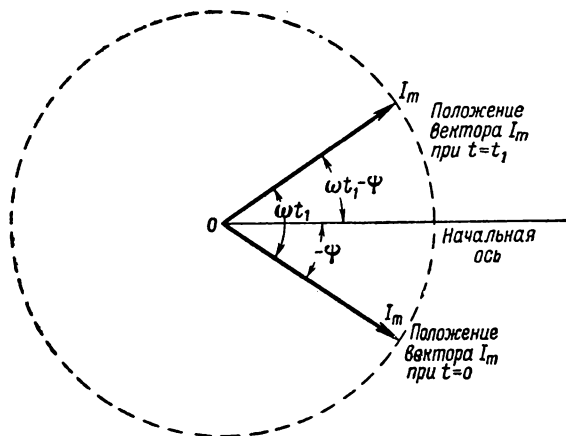


Рис. 184. Векторная диаграмма синусоидального тока
 $i = I_m \cdot \sin(\omega t - \psi)$

и I_{2m} можно изобразить на одной и той же векторной диаграмме (рис. 185). Отложим вектор I_{1m} на векторной диаграмме под углом ψ_1 к начальной оси, а вектор I_{2m} — под углом ψ_2 . Затем сложим геометрически векторы I_{1m} и I_{2m} , как обычные векторы, по правилу параллелограмма и получим некоторый результирующий ток

$$\bar{I}_m = \bar{I}_{1m} + \bar{I}_{2m}. \quad (182)$$

Применяя известную из курса тригонометрии формулу для определения стороны косоугольного треугольника, можно выразить зависимость I_m от I_{1m} и I_{2m} в виде формулы

$$I_m = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2 + 2I_{1m}I_{2m} \cdot \cos(\psi_2 - \psi_1)}, \quad (183)$$

т. е. амплитуда результирующего синусоидального тока равняется корню квадратному из суммы квадратов амплитуд слагаемых синусоидальных токов плюс удвоенное произведение этих амплитуд на косинус угла разности начальных фаз этих токов.

Начальную фазу ψ результирующего тока можно определить по тангенсу этого угла из прямоугольного треугольника ONI_m (рис. 185):

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \psi &= \\ &= \frac{I_{1m} \cdot \sin \psi_1 + I_{2m} \cdot \sin \psi_2}{I_{1m} \cdot \cos \psi_1 + I_{2m} \cdot \cos \psi_2}. \end{aligned} \quad (184)$$

Определив $\operatorname{tg} \psi$, найдем угол ψ по тригонометрическим таблицам для тангенсов.

После того как будут определены I_m и ψ , можно написать выражение для мгновенного значения результирующего синусоидального тока:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi).$$

Пример 103. Требуется определить результирующее напряжение, получаемое от сложения двух синусоидальных электродвижущих сил одинаковой частоты, если известно, что $e_1 = 60 \cdot \sin(\omega t + 30^\circ)$ и $e_2 = 40 \cdot \sin(\omega t + 60^\circ)$.

Решение. В заданном примере $E_{1m} = 60$ в, $E_{2m} = 40$ в, $\psi_1 = 30^\circ$ и $\psi_2 = 60^\circ$.

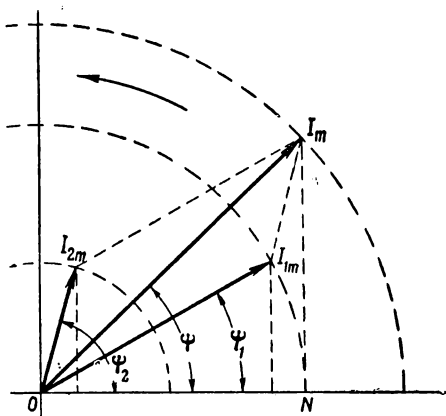


Рис. 185. Сложение векторов тока I_{1m} и I_{2m}

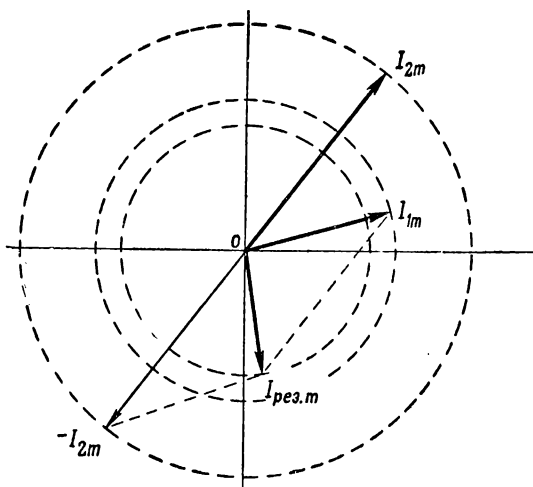


Рис. 186. Вычитание векторов тока I_{1m} и I_{2m}

Применяя формулу (183), найдем амплитуду результирующего синусоидального напряжения:

$$E_m = \sqrt{E_{1m}^2 + E_{2m}^2 + 2E_{1m}E_{2m} \cdot \cos(\psi_2 - \psi_1)} = \\ = \sqrt{60^2 + 40^2 + 2 \cdot 60 \cdot 40 \cos(60^\circ - 30^\circ)} \cong 96 \text{ в.}$$

Применяя формулу (184), найдем начальную фазу результирующего синусоидального напряжения:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{E_{1m} \cdot \sin \psi_1 + E_{2m} \cdot \sin \psi_2}{E_{1m} \cdot \cos \psi_1 + E_{2m} \cdot \cos \psi_2} = \frac{60 \cdot \sin 30^\circ + 40 \cdot \sin 60^\circ}{60 \cdot \cos 30^\circ + 40 \cdot \cos 60^\circ} = \\ = \frac{60 \cdot 0,5 + 40 \cdot 0,866}{60 \cdot 0,866 + 40 \cdot 0,5} = 0,905.$$

По тригонометрическим таблицам находим, что $\psi \cong 42^\circ 10'$.

Итак, результирующая синусоидальная электродвижущая сила равна

$$e = 96 \cdot \sin(\omega t + 42^\circ 10').$$

Когда требуется найти разность двух синусоидальных токов одинаковой частоты, например токов

$$i_1 = I_{1m} \cdot \sin(\omega t + \psi_1) \text{ и } i_2 = I_{2m} \cdot \sin(\omega t + \psi_2),$$

на векторной диаграмме необходимо произвести геометрическое вычитание векторов токов I_{1m} и I_{2m} :

$$\bar{I}_m = \bar{I}_{1m} - \bar{I}_{2m}. \quad (185)$$

Известно, что вычесть из одного вектора другой — значит к первому прибавить второй, но взятый с обратным знаком, т. е. с противоположным направлением.

Следовательно, чтобы вычесть из вектора I_{1m} вектор I_{2m} , надо провести на векторной диаграмме вектор $-I_{2m}$, т. е. вектор,

равный по абсолютной величине вектору I_{2m} , но противоположный ему по знаку, а затем векторы I_{1m} и $(-I_{2m})$ геометрически сложить:

$$\bar{I} = \bar{I}_{1m} + (-\bar{I}_{2m}).$$

На рис. 186 показана векторная диаграмма разности векторов токов I_{1m} и I_{2m} .

Приведенные выше положения о геометрическом сложении векторов синусоидальных токов одинаковой частоты можно распространить на все синусоидальные величины, применяемые в теории переменных токов, например, на синусоидальные электродвижущие силы, синусоидальные напряжения и т. д. В дальнейшем мы широко используем метод векторных диаграмм для исследования режимов в цепях переменного синусоидального тока.

§ 100. ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Если все положительные и отрицательные мгновенные значения синусоидального переменного тока сложить, то сумма их будет равна нулю, так как каждому положительному мгновенному значению синусоидального тока всегда найдется равный ему по абсолютной величине отрицательный мгновенный ток (рис. 187).

Но если алгебраическая сумма всех мгновенных значений синусоидального тока за период равна нулю, то и среднее значение этого тока за период также равно нулю:

$$I_{\text{ср}}(T) = 0.$$

Следовательно, среднее значение синусоидального тока за период не может служить для измерения этого тока. Если амперметр, который измеряет среднее значение тока, включить в цепь переменного синусоидального тока, то он покажет величину тока, равную нулю, хотя фактически этот ток существует в цепи и производит некоторую работу, например выделяет тепло.

Возникает вопрос, что же в данном случае

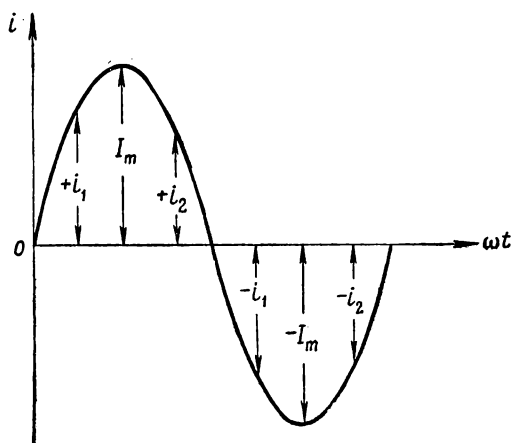


Рис. 187. Алгебраическая сумма мгновенных значений тока за период равна нулю

Может служить мерой измерения синусоидального тока и какую величину тока показывают приборы, включенные в цепь переменного синусоидального тока, если они не измеряют среднее его значение за период.

Чтобы судить о величине переменного синусоидального тока, его сравнивают с током постоянным по их тепловому действию.

Два тока, из которых один синусоидальный, а другой постоянный, эквивалентны по тепловому действию, если они, протекая по одинаковым сопротивлениям, за одинаковые отрезки времени выделяют одинаковое количество тепла. Например, если постоянный ток $I_{\text{пост}} = 5 \text{ а}$, протекая через сопротивление $r = 10 \text{ ом}$, за время $t = 10 \text{ сек.}$ выделит количество тепла $Q = 0,24 I_{\text{пост}}^2 r t = 0,24 \cdot 5^2 \cdot 10 \cdot 10 = 600$ малых калорий, то переменный синусоидальный ток, эквивалентный данному постоянному току, выделит в сопротивлении $r = 10 \text{ ом}$ за время $t = 10 \text{ сек.}$ то же количество тепла. Следовательно, величину синусоидального переменного тока $I_{\text{пер}}$, эквивалентного данному постоянному току $I_{\text{пост}} = 5 \text{ а}$, необходимо считать равной также пяти амперам, т. е.

$$I_{\text{пер}} = I_{\text{пост}} = 5 \text{ а.}$$

Величину переменного тока, эквивалентную постоянному току и, следовательно, равную ему численно, называют действующим значением переменного синусоидального тока.

Следовательно, действующее значение переменного синусоидального тока численно равно току постоянному, эквивалентному данному синусоидальному току, т. е. выделяющему порознь с ним в одинаковом сопротивлении за одинаковый отрезок времени одинаковое количество тепла.

Математический анализ, который мы здесь не можем привести, показывает, что величина действующего значения переменного синусоидального тока находится в строго определенной зависимости от амплитуды этого тока:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad (186)$$

т. е. действующее значение I переменного синусоидального тока в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитуды этого тока.

Пример 104. Определить действующее значение переменного синусоидального тока, если амплитуда этого тока $I_m = 28,2 \text{ а}$.

Решение. Применяя формулу (186), находим

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{28,2}{1,41} = 20 \text{ а.}$$

Амперметр, например тепловой, электромагнитной или электродинамической системы, включенный в цепь переменного синусоидального тока, показывает действующее значение тока.

В некоторых случаях практики приходится интересоваться средним значением переменного синусоидального тока за половину периода, например за положительную полуволну синусоиды.

Математический анализ показывает, что среднее значение переменного синусоидального тока за половину периода равно

$$I_{\text{ср}} \left(\frac{T}{2} \right) = \frac{2}{\pi} I_m = 0,637 I_m. \quad (187)$$

Пример 105. Определить среднее значение переменного синусоидального тока за половину периода (за положительную полуволну синусоиды), если амплитуда тока $I_m = 25$ а.

Решение. Применяя формулу (187), находим

$$I_{\text{ср}} \left(\frac{T}{2} \right) = 0,637 I_m = 0,637 \cdot 25 = 15,9 \text{ а.}$$

При исследовании кривых переменного тока важно бывает знать отношение действующего значения тока к среднему за половину периода (положительную полуволну). Это отношение для синусоидального тока равно

$$k = \frac{I}{I_{\text{ср}} \left(\frac{T}{2} \right)} = \frac{\frac{I_m}{\sqrt{2}}}{\frac{2}{\pi} I_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Аналогично действующему значению переменного синусоидального тока можно говорить о действующем значении переменной синусоидальной электродвижущей силы или переменного синусоидального напряжения.

Действующее значение напряжения в $\sqrt{2}$ меньше его амплитуды. Вольтметр тепловой, электромагнитной или электродинамической системы, включенный в цепь переменного тока, показывает действующее значение синусоидального напряжения.

Пример 106. Определить амплитуду переменного синусоидального напряжения, если действующее значение его $U = 100$ в.

Решение. Амплитуда напряжения

$$U_m = \sqrt{2} U = 1,41 \cdot 100 = 141 \text{ в.}$$

ГЛАВА XX

ПРОСТАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНОСТЬЮ И АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

§ 101. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Активным сопротивлением в цепях переменного тока называют сопротивление, в котором происходит необратимый процесс превращения электрической энергии в какой-либо иной вид энергии, например в тепловую. Примером активного сопротивления может служить сопротивление проволоки реостата, проводов цепи, нити электрической лампы и т. д., где электрическая энергия преобразуется в тепловую энергию, а последняя рассеивается. Вполне очевидно, что эта тепловая энергия не может быть преобразована в электрическую энергию в данной цепи.

О величине активного сопротивления проводника в общем случае можно судить по той мощности, которая развивается источником электрической энергии в этом проводнике:

$$r = \frac{P}{I^2}, \quad (188)$$

где r — активное сопротивление проводника в омах;

I — действующее значение переменного тока в этом проводнике в амперах;

P — мощность, расходуемая в активном сопротивлении проводника, в ваттах.

Пример 107. Мощность, потребляемая в активном сопротивлении потребителя, $P = 800$ вт, а действующее значение тока в нем $I = 2,5$ а. Определить активное сопротивление этого потребителя.

Решение. По формуле (188) находим

$$r = \frac{P}{I^2} = \frac{800}{2,5^2} = \frac{800}{6,25} = 128 \text{ ом.}$$

§ 102. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Пусть некоторое активное сопротивление r подключено к источнику электрической энергии (рис. 188), обладающему переменным синусоидальным напряжением

$$u = U_m \cdot \sin \omega t, \quad (189)$$

где u — мгновенное значение напряжения в вольтах;
 U_m — амплитуда напряжения в вольтах;
 ω — угловая частота;
 t — время в секундах;
 ωt — фаза напряжения, выраженная в радианах.

В данном случае для мгновенных значений переменного напряжения и переменного тока справедливы законы Ома, Кирхгофа и Ленца — Джоуля, так как всякий переменный ток в течение очень малого отрезка времени Δt можно рассматривать как ток постоянный. Последнее тем справедливей, чем меньше промежуток Δt , и абсолютно справедливо, если Δt принять за бесконечно малый промежуток времени.

Следовательно, на основе закона Ома

$$i = \frac{u}{r}, \quad (190)$$

где i — мгновенное значение тока в амперах.

Подставив в формулу (190) вместо u его выражение из формулы (189), получим

$$i = \frac{U_m}{r} \cdot \sin \omega t, \quad (191)$$

или, иначе,

$$i = I_m \cdot \sin \omega t, \quad (192)$$

где

$$I_m = \frac{U_m}{r} \text{ — амплитуда тока.} \quad (193)$$

На основании формулы (192) можно сделать следующие выводы:

1. В цепи с активным сопротивлением при синусоидальном напряжении проходит синусоидальный переменный ток.

2. Напряжение и ток в цепи с активным сопротивлением совпадают по фазе, т. е. одновременно достигают своих нулевых и максимальных значений одинакового знака.

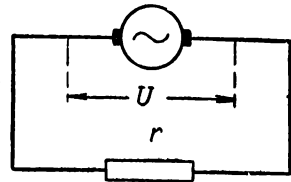


Рис. 188. Простая цепь переменного тока с активным сопротивлением

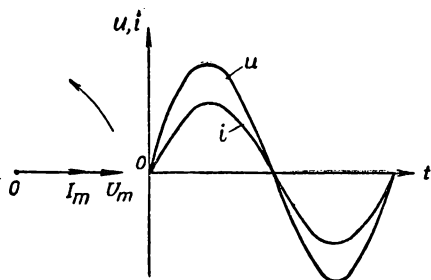


Рис. 189. Векторная и плоская диаграммы тока и напряжения для цепи с активным сопротивлением

формулы (193) разделить на $\sqrt{2}$, то получим

$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot r}, \text{ или } I = \frac{U}{r}. \quad (194)$$

Формула (194) является математическим выражением закона Ома для цепи с активным сопротивлением.

Мгновенная мощность p , поглощаемая в активном сопротивлении r , равна произведению мгновенного значения напряжения на мгновенное значение тока:

$$p = ui = U_m I_m \cdot \sin^2 \omega t. \quad (195)$$

Из формулы (195) следует, что мгновенная мощность изменяется пропорционально $\sin^2 \omega t$, т. е. это не синусоидальная величина. На рис. 190 показан график мгновенной мощности p .

Максимальное значение мгновенной мощности равно

$$P_m = U_m I_m.$$

Среднее значение мощности, потребляемой активным сопротивлением за период T , равно половине мгновенной максимальной мощности:

$$\begin{aligned} P_{\text{ср}} &= \frac{P_m}{2} = \frac{U_m I_m}{2} = \\ &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \end{aligned}$$

или

$$P_{\text{ср}} = UI, \quad (196)$$

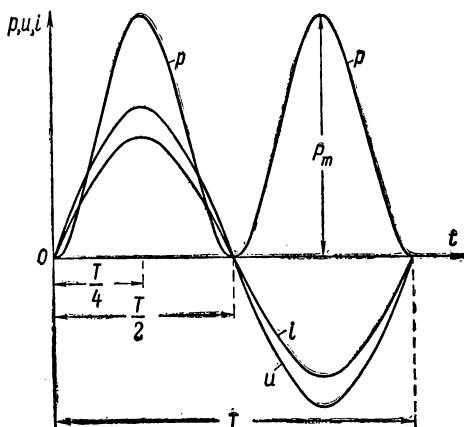


Рис. 190. График мгновенной мощности для цепи с активным сопротивлением

т. е. средняя мощность, потребляемая активным сопротивлением за период, равна произведению действующего значения напряжения на действующее значение тока.

Следует отметить, что в отличие от цепи постоянного тока в цепи переменного тока с активным сопротивлением энергия от источника подается к потребителю не непрерывным равномерным потоком, а в виде двух импульсов за период. О величине энергии, потребляемой активным сопротивлением, можно судить по величине площадок, ограниченных осью времени и графиком мгновенной мощности (рис. 191). Величина этой энергии за период T равна

$$W = UIT, \quad (197)$$

где W — энергия в джоулях.

Так как согласно закону Ома

$$U = Ir,$$

то вместо выражения (197) можно написать

$$W = I^2 r T. \quad (198)$$

Энергия в таких активных сопротивлениях, как реостаты, обычные металлические провода и т. п., расходуется на образование тепловой энергии.

Пример 108. К цепи с активным сопротивлением $r = 20$ ом приложено напряжение $u = 169,2 \cdot \sin 314t$. Определить режим работы тока в данной цепи.

Решение. Действующее напряжение

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{169,2}{1,41} = 120 \text{ в.}$$

Действующее значение тока

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{20} = 6 \text{ а.}$$

Средняя мощность за период

$$P = UI = 120 \cdot 6 = 720 \text{ вт.}$$

Частота переменного тока

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{314}{2 \cdot 3,14} = 50 \text{ гц.}$$

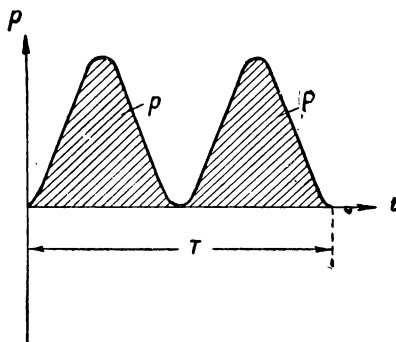


Рис. 191. Величина энергии, потребляемая активным сопротивлением, определяется площадью заштрихованных площадок

Период переменного тока

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ сек.}$$

Энергия, расходуемая током за период T ,

$$W = PT = 720 \cdot 0,02 = 14,4 \text{ дж.}$$

§ 103. ИНДУКТИВНОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Допустим, что в катушке без железного сердечника, обладающей индуктивностью L и активным сопротивлением $r \approx 0$ (рис. 192), проходит переменный синусоидальный ток

$$i = I_m \cdot \sin \omega t.$$

Он сопровождается переменным синусоидальным магнитным потоком, совпадающим с ним по фазе (рис. 193).

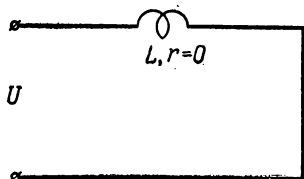


Рис. 192. Цепь переменного тока с катушкой индуктивности, активное сопротивление которой практически равно нулю

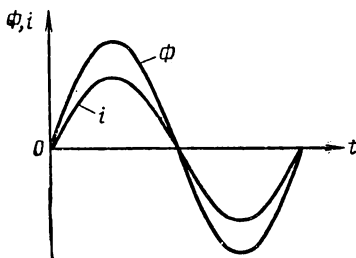


Рис. 193. Магнитный поток в катушке без стали совпадает по фазе с переменным током

Переменный магнитный поток индуцирует в катушке электродвижущую силу самоиндукции e_L , пропорциональную скорости изменения тока:

$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}, \quad (199)$$

где e_L — индуцированная электродвижущая сила самоиндукции в вольтах;

$\frac{\Delta i}{\Delta t}$ — скорость изменения тока в амперах в секунду;

L — индуктивность катушки в генри.

Знак минус, стоящий в формуле (199), отображает **правило Ленца**, согласно которому индуцированная электродвижущая сила самоиндукции **всякий раз возникает такого направления, при котором она противодействует всем изменениям тока**. Если

ток возрастает, то она направлена навстречу ему, а если уменьшается,— попутно с током.

На основании этих соображений построим развернутую диаграмму электродвижущей силы самоиндукции, пользуясь развернутой диаграммой тока.

В первую четверть периода ток i нарастает в положительном направлении и электродвижущая сила самоиндукции, противодействуя его росту, должна быть направлена навстречу ему, т. е. должна иметь отрицательный знак. Величина тока i имеет наибольшую скорость изменения во времени при переходе через нулевое значение и наименьшую — при переходе через максимальное значение. На рис. 194 показано, что за один и тот же отрезок времени Δt приращение тока Δi больше при значениях тока, близких к нулевому.

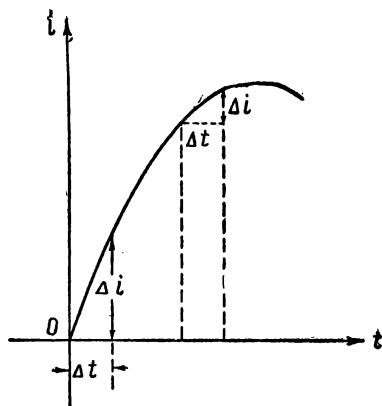


Рис. 194. Скорость нарастания тока $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ по мере приближения тока к максимуму уменьшается

Следовательно, электродвижущая сила самоиндукции максимальна при переходе через нуль, т. е. в момент, когда отношение $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ максимально, и она равна нулю, когда ток i переходит через максимум, т. е. когда $\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0$ (рис. 195).

Во вторую четверть периода ток i , оставаясь положительным, убывает по величине. Электродвижущая сила самоиндукции, противодействующая его убыванию, должна быть направ-

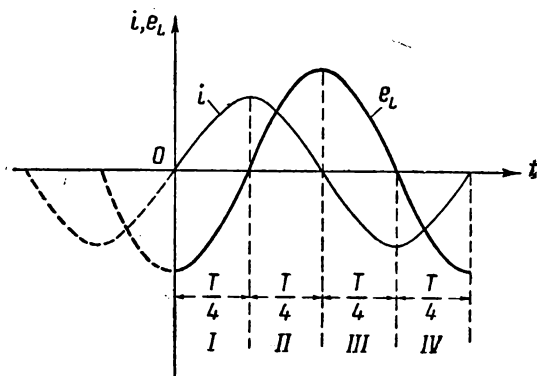


Рис. 195. Развернутая диаграмма переменного синусоидального тока и индуцированной синусоидальной электродвижущей силы самоиндукции

лена попутно с током, т. е. должна также иметь положительный знак. Величина тока i по мере приближения к нулю увеличивает скорость своего изменения, и $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ достигает максимального значения при переходе через нуль. Следовательно, электродвижущая сила самоиндукции в начале второй четверти периода нарастает в положительном направлении и к концу второй четверти периода, когда ток проходит через нуль, достигает максимального положительного значения.

В третью четверть периода ток i становится отрицательным и растет по абсолютному значению, уменьшая этот рост по мере приближения к максимуму. В связи с этим электродвижущая сила самоиндукции, противодействуя росту тока, имеет положительное направление и с ростом его уменьшается, так как приращения тока Δi в единицу времени становятся все меньшими и меньшими по мере приближения тока к амплитуде.

В четвертую четверть периода ток i убывает, стремясь к нулю. Электродвижущая сила самоиндукции, противодействуя его убыванию, имеет одинаковое направление с ним, т. е. она по знаку отрицательна, как и ток. Ток i по мере приближения к нулю увеличивает интенсивность своего изменения, достигая максимума при переходе через нуль. В соответствии с этим электродвижущая сила самоиндукции по мере приближения тока i к нулю растет и при переходе через нуль становится максимальной по абсолютной величине.

Сопоставляя развернутые диаграммы тока i и электродвижущей силы самоиндукции e_L (рис. 195), нетрудно видеть, что электродвижущая сила самоиндукции e_L отстает по фазе от тока на четверть периода $\left(\frac{T}{4}\right)$, или, иначе, на угол $\frac{\pi}{2}$.

Следовательно, если переменный синусоидальный ток, протекающий по обмотке катушки, определяется по формуле

$$i = I_m \cdot \sin \omega t,$$

то электродвижущая сила самоиндукции в катушке будет определяться по формуле

$$e_L = E_{Lm} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (200)$$

Величина электродвижущей силы самоиндукции, как известно, пропорциональна скорости изменения тока:

$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}, \quad (201)$$

т. е., иначе сказать, она пропорциональна частоте тока, так как чем больше частота тока, тем больше скорость его изменения во времени.

Одновременно с этим величина электродвижущей силы самоиндукции зависит, как это видно из формулы (201), от индуктивности L катушки. Чем больше индуктивность катушки, тем больше при прочих равных условиях электродвижущая сила самоиндукции в катушке.

Следовательно, электродвижущая сила самоиндукции катушки пропорциональна частоте тока в катушке и величине индуктивности ее. В соответствии с этим формула для определения действующего значения электродвижущей силы самоиндукции имеет следующий вид:

$$E_L = \omega LI, \quad (202)$$

где E_L — действующее значение электродвижущей силы самоиндукции в вольтах;

I — действующее значение тока, протекающего в катушке, в амперах;

L — индуктивность катушки в генри;

ω — угловая частота тока.

Пример 109. Определить действующее значение электродвижущей силы самоиндукции в катушке, если ток, протекающий в обмотке катушки, $I = 2$ а, индуктивность катушки $L = 0,01$ гн и угловая частота $\omega = 1000 \frac{1}{\text{сек}}$.

Решение. Применяя формулу (202), находим:

$$E_L = \omega LI = 1000 \cdot 0,01 \cdot 2 = 20 \text{ в.}$$

Помножив левую и правые части равенства (202) на $\sqrt{2}$, получим выражение для амплитуды электродвижущей силы самоиндукции

$$\sqrt{2} E_L = \sqrt{2} \omega LI,$$

или, иначе,

$$E_{Lm} = \omega LI_m, \quad (203)$$

где E_{Lm} — амплитуда электродвижущей силы самоиндукции;

I_m — амплитуда тока.

В соответствии с этим формуле (200) для определения мгновенного значения электродвижущей силы самоиндукции можно придать такой вид:

$$e_L = E_{Lm} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \omega LI_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (204)$$

Так как активное сопротивление катушки по условию равно нулю, то падение напряжения в нем также равно нулю. В этом случае все напряжение, приложенное к катушке, целиком идет на преодоление электродвижущей силы самоиндукции катушки.

А это значит, что мгновенные значения напряжения u и электродвижущей силы e_L в любой момент равны по абсолютной величине и противоположны по знаку:

$$u = -e_L, \quad (205)$$

или согласно формуле (204)

$$u = -\omega L I_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Но, как известно из тригонометрии,

$$-\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

а поэтому

$$u = \omega L I_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (206)$$

На основании формулы (206) можно сделать следующий вывод: если в катушке индуктивности проходит синусоидальный ток $i = I_m \cdot \sin \omega t$, то напряжение u , приложенное к этой катушке, также синусоидально и опережает по фазе ток на угол $\frac{\pi}{2}$.

Угол сдвига фаз напряжения u и электродвижущей силы самоиндукции e_L равен π , так как

$$\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - \left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \pi,$$

т. е. напряжение u опережает по фазе электродвижущую силу самоиндукции e_L на угол π .

На рис. 196 приведены векторная и развернутая диаграммы напряжения, тока и электродвижущей силы самоиндукции для рассматриваемого нами режима в катушке индуктивности.

Из формулы (206) следует, что максимума напряжения u достигает в тот момент, когда $\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = 1$.

Следовательно, амплитуда напряжения

$$U_m = \omega L I_m. \quad (207)$$

Разделив левую и правую части последнего равенства на $\sqrt{2}$, получим выражение для действующего значения напряжения:

$$\frac{U_m}{\sqrt{2}} = \omega L \frac{I_m}{\sqrt{2}},$$

или, иначе,

$$U = I \omega L. \quad (208)$$

Отсюда можем получить формулу закона Ома для чисто индуктивной цепи:

$$I = \frac{U}{\omega L}, \quad (209)$$

где I — действующее значение тока в катушке;
 U — действующее значение напряжения, приложенного к катушке.

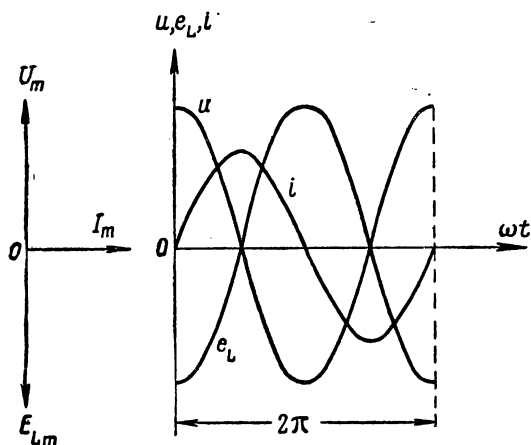


Рис. 196. Векторная и развернутая диаграммы тока, напряжения и электродвижущей силы самоиндукции

Величина ωL , входящая в формулу (209), представляет собой индуктивное сопротивление катушки и обычно обозначается символом x_L :

$$x_L = \omega L, \quad (210)$$

где x_L — индуктивное сопротивление в омах;
 L — индуктивность катушки в генри;
 ω — угловая частота в $\frac{1}{\text{сек}}$.

Из формулы (210) следует, что напряжение U , приложенное к катушке, равно произведению тока I на индуктивное сопротивление ωL катушки, т. е. в рассматриваемом случае оно целиком расходуется в индуктивном сопротивлении катушки. Но, с другой стороны, известно, что напряжение U , приложенное к катушке, целиком компенсируется электродвижущей силой самоиндукции E_L катушки, т. е.

$$|U| = |E_L| = I\omega L.$$

Отсюда следует, что индуктивное сопротивление катушки обусловлено противодействием электродвижущей силы самоиндукции.

Из двух катушек, по которым протекает одинаковый синусоидальный ток, большим индуктивным сопротивлением обладает та катушка, в которой индуктируется большая электродвижущая сила самоиндукции.

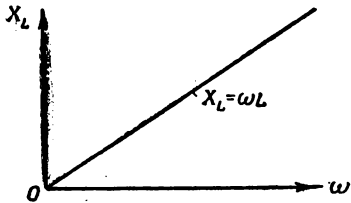


Рис. 197. График зависимости индуктивного сопротивления катушки от частоты тока

Следовательно, индуктивное сопротивление по своей природе отличается от активного (например, активного сопротивления металлического проводника), обусловленного противодействием току элементарных частиц вещества.

Из формулы (210) следует, что индуктивное сопротивление катушки прямо пропорционально частоте тока, протекающего через катушку, и индуктивности катушки.

На рис. 197 показан график зависимости индуктивного сопротивления катушки от частоты тока.

Пример 110. Определить индуктивное сопротивление катушки, обладающей индуктивностью $L = 0,02$ гн, при частотах $f_1 = 50$ гц, $f_2 = 1000$ гц и $f_3 = 1\,000\,000$ гц, а также определить ток в катушке, если приложенное к ней напряжение $U = 125,6$ в и активное сопротивление катушки $r = 0$.

Решение. По формуле (210) находим:

$$x_{L_1} = \omega_1 L = 2\pi f_1 L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,02 = 6,28 \text{ ом};$$

$$x_{L_2} = \omega_2 L = 2\pi f_2 L = 2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 0,02 = 125,6 \text{ ом};$$

$$x_{L_3} = \omega_3 L = 2\pi f_3 L = 2 \cdot 3,14 \cdot 1\,000\,000 \cdot 0,02 = 125\,600 \text{ ом}.$$

Ток в катушке:

$$I_1 = \frac{U}{x_{L_1}} = \frac{125,6}{6,28} = 20 \text{ а};$$

$$I_2 = \frac{125,6}{125,6} = 1 \text{ а};$$

$$I_3 = \frac{125,6}{125\,600} = 0,001 \text{ а}.$$

Из приведенного примера видно, какое влияние на величину тока в катушке оказывает частота приложенного к ней напряжения. При очень высоких частотах ток через катушку, обладающую большой индуктивностью, практически не проходит. При частоте $f = 0$ индуктивное сопротивление равно нулю.

Пример 111. Определить индуктивность катушки, активное сопротивление которой $r = 0$, если при напряжении $U = 220$ в, приложенном к ней, и частоте $f = 50$ гц ток в ней $I = 5$ а.

Решение. Индуктивное сопротивление катушки

$$x_L = \omega L = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} = 44 \text{ ом},$$

откуда

$$L = \frac{44}{\omega} = \frac{44}{2\pi f} = \frac{44}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,14 \text{ гн}.$$

Мгновенная мощность p в катушке равна произведению мгновенного значения напряжения u на мгновенное значение тока i . Следовательно, для данного случая

$$p = ui = U_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) I_m \cdot \sin \omega t.$$

Из курса тригонометрии известно, что

$$\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \sin \omega t \cdot \cos \frac{\pi}{2} + \cos \omega t \cdot \sin \frac{\pi}{2} = \cos \omega t,$$

так как

$$\cos \frac{\pi}{2} = 0 \text{ и } \sin \frac{\pi}{2} = 1,$$

а поэтому

$$p = U_m I_m \cdot \cos \omega t \cdot \sin \omega t.$$

Но, как известно,

$$2 \sin \omega t \cdot \cos \omega t = \sin 2\omega t,$$

а поэтому

$$\sin \omega t \cdot \cos \omega t = \frac{\sin 2\omega t}{2}$$

и

$$p = \frac{U_m I_m}{2} \cdot \sin 2\omega t = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \sin 2\omega t,$$

или

$$p = UI \sin 2\omega t. \quad (211)$$

Из формулы (211) следует, что мгновенная мощность, развиваемая током в катушке, есть величина синусоидальная, но изменяющаяся с двойной частотой по сравнению с частотой тока и напряжения, так как фаза ее равна $2\omega t$.

В момент времени $t=0$ величина $p=0$, так как $i=0$, а $u=U_m$. В момент $t=\frac{T}{4}$ величина $p=0$, так как $i=I_m$,

а $u=0$. Точно так же $p=0$ при $t=\frac{T}{2}$, $t=\frac{3}{4}T$ и $t=T$. В первую четверть периода мгновенная мощность положительна, так как произведение положительного напряжения на положительный ток — величина положительная. Во вторую четверть периода мгновенная мощность отрицательна, так как мгновенные значения напряжения и тока имеют различные знаки. В третью четверть периода мгновенная мощность положительна, так как мгновенные значения напряжения и тока одинакового отрицательного знака. И, наконец, в четвертую четверть периода мгновенная мощность отрицательна, так как мгновенные значения тока и напряжения имеют противоположные знаки. На рис. 198 показан график мгновенной мощности p .

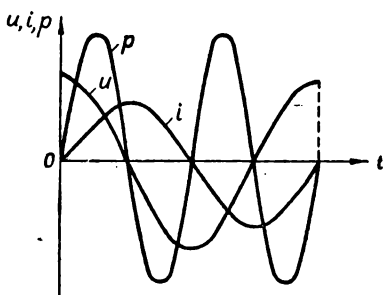


Рис. 198. График изменения мгновенной мощности для катушки, в которой активное сопротивление $r=0$

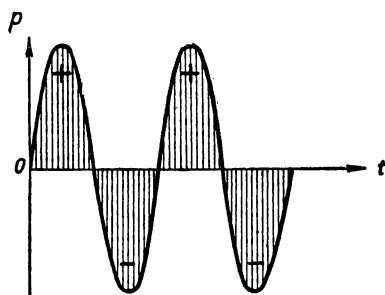


Рис. 199. Колебания энергии в цепи с катушкой индуктивности, активное сопротивление которой $r=0$

Среднее значение мощности за период, очевидно, будет равно нулю:

$$P_{\text{ср}} = 0, \quad (212)$$

так как при сложении всех положительных и отрицательных значений мощности за период, изменяющийся по синусоиде, получим сумму, равную нулю.

Это значит, что **среднее значение энергии, потребляемой катушкой за один период, равно нулю**. В те моменты времени, когда мгновенная мощность положительна (первая и третья четверти периода), катушка забирает энергию от генератора, запасая ее в своем магнитном поле:

$$W = \frac{LI_m^2}{2}, \quad (213)$$

где W — энергия магнитного поля в джоулях, запасаемая за четверть периода;

L — индуктивность в генри;

I_m — максимальная величина тока в амперах.

В момент времени, когда мгновенная мощность отрицательна (вторая и четвертая четверти периода), катушка сама как бы становится генератором электрической энергии и возвращает энергию генератору.

Заштрихованные площадки на рис. 199, ограниченные осью времени и кривой мгновенной мощности p , дают представление о течении энергии в цепи с катушкой, активное сопротивление которой практически равно нулю. Площадки, расположенные выше линии абсцисс, определяют положительную энергию, т. е. энергию, поступающую от источника к катушке, а площадки, расположенные ниже линии абсцисс, определяют отрицательную энергию, т. е. энергию, возвращаемую катушкой источнику.

Следует особо отметить, что хотя источник электрической энергии питает ток катушку, средняя мощность, развиваемая в ней, равна нулю, так как катушка не потребляет электрической энергии. Значит, здесь происходит перекачивание энергии от источника к катушке и обратно, т. е. источник работает бесполезно в смысле отдачи энергии.

В отличие от активного сопротивления индуктивное сопротивление называется реактивным, т. е. таким, в котором происходит обратимый процесс — колебание энергии от источника электрической энергии к катушке и обратно.

Мощность, развиваемая током в реактивном сопротивлении катушки, является **реактивной мощностью**. Ее среднее значение за период равно нулю.

О величине реактивной мощности в цепи чаще всего судят по ее амплитуде, которую обычно и называют просто реактивной мощностью.

Следовательно, если мгновенная мощность в цепи с катушкой индуктивности, активным сопротивлением которой можно пренебречь, равна

$$p = UI \cdot \sin 2\omega t, \quad (214)$$

то реактивная мощность в этой цепи равна

$$P_r = UI, \quad (215)$$

где U — напряжение в вольтах;

I — ток в амперах;

P_r — реактивная мощность (амплитуда реактивной мощности) в вольт-амперах.

Реактивная мощность в отличие от активной измеряется в вольт-амперах, называемых реактивными вольт-амперами.

1 вольт-ампер реактивный (1 *вар*) = 1 вольт · 1 ампер.

1 киловольт-ампер реактивный (*квар*) = 1000 *вар*.

Пример 112. К катушке индуктивности, обладающей индуктивностью $L = 0,05$ гн и активным сопротивлением $r \approx 0$, приложено напряжение $U = 100$ в. Определить мгновенное значение мощности в цепи для момента

времени $t = 78,5 \cdot 10^{-5}$ сек., реактивную мощность и максимальную энергию, запасаемую магнитным полем катушки, если угловая частота напряжения $\omega = 1000 \frac{1}{сек}$.

Решение. Индуктивное сопротивление цепи равно

$$x_L = \omega L = 1000 \cdot 0,05 = 50 \text{ ом.}$$

Действующее значение тока равно

$$I = \frac{U}{x_L} = \frac{100}{50} = 2 \text{ а.}$$

Мгновенная мощность для момента времени $t = 78,5 \cdot 10^{-5}$ сек. равна

$$\begin{aligned} p &= UI \cdot \sin \omega t = 100 \cdot 2 \cdot \sin 1000 \cdot 78,5 \cdot 10^{-5} = 200 \cdot \sin 0,785 = \\ &= 200 \cdot \sin 45^\circ = 200 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 141 \text{ вар.} \end{aligned}$$

Реактивная мощность равна

$$P_r = UI = 100 \cdot 2 = 200 \text{ вар.}$$

§ 104. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНОСТЬЮ И АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Теперь допустим, что катушка индуктивности, обладающая индуктивностью L , имеет такое активное сопротивление r , которым практически пренебречь нельзя. В схеме, изображенной на рис. 200, активное сопротивление катушки показано отдельно от нее, т. е. мы рассматриваем катушку с r и L как цепь с последовательно соединенными активным сопротивлением r и индуктивным сопротивлением $x_L = \omega L$.

Пусть в цепи катушки существует переменный синусоидальный ток

$$i = I_m \cdot \sin \omega t.$$

Напряжение U , приложенное к рассматриваемой цепи, расходуется в активном r и индуктивном ωL сопротивлениях.

Мгновенное значение напряжения, расходуемого в активном сопротивлении, равно

$$u_a = Ir \cdot \sin \omega t.$$

Мгновенное значение напряжения, расходуемого в индуктивном сопротивлении, равно

$$u_L = I\omega L \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Мгновенное значение напряжения, приложенного ко всей цепи, равно алгебраической сумме мгновенных значений напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях:

$$u = u_a + u_L = I_m r \cdot \sin \omega t + I_m \omega L \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (216)$$

Так как слагаемые этой суммы — синусоидальные величины одинаковой частоты, то результирующее напряжение также должно быть синусоидальным и иметь ту же частоту, что и слагаемые напряжения. А это значит, что для определения действующего значения напряжения, приложенного к данной цепи, можно на векторной диаграмме геометрически сложить действующие значения напряжений:

1) $U_a = Ir$ — действующее значение падения напряжения в активном сопротивлении;

2) $U_L = I \omega L$ — действующее значение падения напряжения в индуктивном сопротивлении.

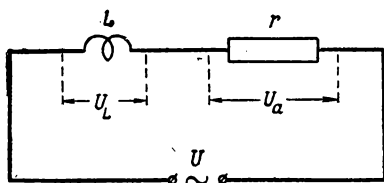


Рис. 200. Цепь переменного тока с индуктивностью и активным сопротивлением

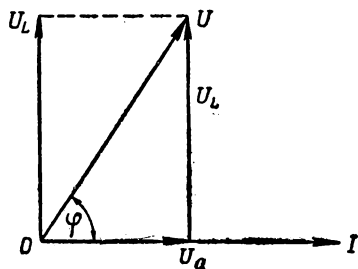


Рис. 201. Векторная диаграмма тока и напряжений для цепи с r и L , соединенными последовательно

До сих пор мы векторные диаграммы строили, применяя амплитуды синусоидальных величин. В дальнейшем же для удобства будем строить векторные диаграммы, применяя действующие значения величин. Для этого в обычной векторной диаграмме все векторы надо уменьшить в $\sqrt{2}$, так как $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$; $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ и т. д.

Действующее значение тока I одинаково в активном сопротивлении r и в катушке с индуктивным сопротивлением x_L , так как они соединены последовательно.

Отложим вектор тока I на векторной диаграмме по горизонтали, так как начальная фаза тока $i = I_m \cdot \sin \omega t$ равна нулю (рис. 201).

Напряжение U_a совпадает по фазе с током, поскольку оно приложено к участку цепи, обладающему только активным со-

противлением, а поэтому вектор U_a отложим на векторной диаграмме в направлении вектора тока I .

Напряжение U_L опережает ток I по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$, поскольку оно приложено к участку цепи, обладающему только индуктивным сопротивлением, а поэтому вектор U_L отложим на векторной диаграмме в направлении, перпендикулярном вектору I , и вверх, т. е. на угол $\frac{\pi}{2}$ против часовой стрелки.

Сложив геометрически U_a и U_L , получим действующее значение результирующего напряжения U , приложенного ко всей цепи.

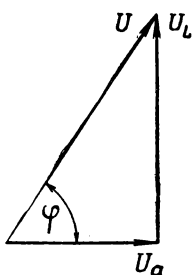


Рис. 202. Треугольник напряжений

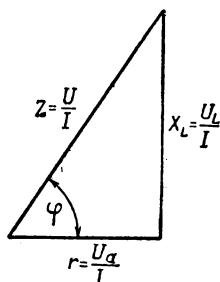


Рис. 203. Треугольник сопротивлений

Выделим из векторной диаграммы прямоугольный треугольник, составленный из векторов U_a , U_L и U , который называется **треугольником напряжений** (рис. 202). Из треугольника напряжений на основании теоремы Пифагора находим соотношение между напряжениями:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}. \quad (217)$$

Пример 113. Вольтметры, подключенные к активному сопротивлению r и катушке L , активное сопротивление которой можно принять равным нулю, дают показания $U_a = 30$ в и $U_L = 40$ в. Определить результирующее напряжение, приложенное ко всей цепи.

Решение. По формуле (217) находим

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50 \text{ в.}$$

Разделив все стороны треугольника напряжений на величину тока I , получим так называемый **треугольник сопротивлений** (рис. 203).

Из треугольника сопротивлений имеем

$$Z = \sqrt{r^2 + x_L^2},$$

где Z — полное сопротивление всей цепи в омах.

Пример 114. Катушка индуктивности имеет активное сопротивление $r = 12$ ом и индуктивное сопротивление $x_L = 9$ ом. Определить полное сопротивление катушки.

Решение. По формуле (218) находим

$$Z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{12^2 + 9^2} = 15 \text{ ом.}$$

Зная напряжение U , приложенное к цепи, и полное сопротивление Z цепи, можно найти величину тока по формуле

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}. \quad (219)$$

Формула (219) является математическим выражением закона Ома для цепи с индуктивным и активным сопротивлениями, соединенными последовательно.

Пример 115. Определить ток в цепи с активным сопротивлением $r = 30$ ом, индуктивностью $L = 0,04$ гн, если угловая частота $\omega = 1000 \frac{1}{\text{сек}}$ и напряжение U , приложенное к цепи, равно 120 в.

Решение. По формуле (219) находим

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} = \frac{120}{\sqrt{30^2 + (1000 \cdot 0,04)^2}} = 2,4 \text{ а.}$$

Из треугольника сопротивлений находим угол сдвига фаз φ между напряжением U и током I по формуле

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}. \quad (220)$$

или по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{r}. \quad (221)$$

Определив $\cos \varphi$ или $\operatorname{tg} \varphi$, по тригонометрическим таблицам можно найти и угол φ . Так как напряжение U опережает по фазе ток I на угол φ , то последний положителен. Следовательно, если

$$i = I_m \cdot \sin \omega t,$$

то

$$u = U_m \cdot \sin (\omega t + \varphi).$$

Мгновенная мощность, развиваемая током в цепи, равна

$$P = ui = U_m \cdot \sin (\omega t + \varphi) I_m \cdot \sin \omega t$$

и уже не является синусоидальной величиной (рис. 204).

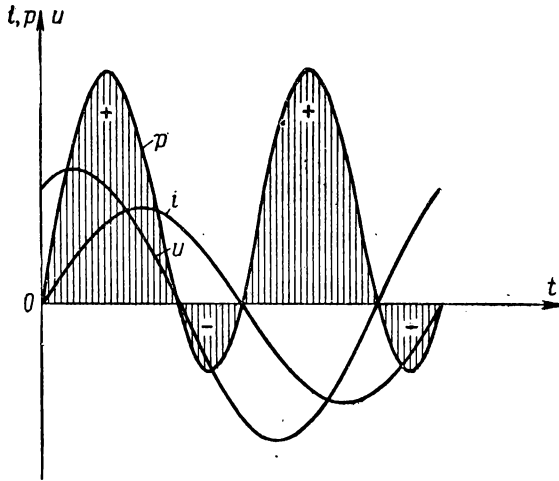


Рис. 204. График изменения мгновенной мощности в цепи с последовательно соединенными r и L

На рис. 204 приведены развернутые диаграммы тока и напряжения, а также график мгновенной мощности для рассматриваемой цепи.

Если все стороны треугольника напряжений (рис. 202) помножить на действующее значение тока I , то получим так называемый **треугольник мощностей** (рис. 205).

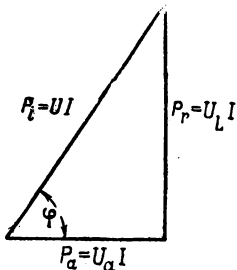
Треугольник мощностей геометрически связывает между собой три мощности: активную P_a , реактивную P_r и полную P_i .

Активная мощность P_a равна произведению активной составляющей напряжения U_a на величину тока I :

$$P_a = U_a I.$$

Из треугольника напряжений имеем: $U_a = U \cdot \cos \varphi$, а поэтому активную мощность можно выразить следующей формулой:

$$P_a = UI \cdot \cos \varphi, \quad (222)$$



где P_a — активная мощность в ваттах;
 U — напряжение в вольтах;
 I — ток в амперах;
 $\cos \varphi$ — косинус угла сдвига фаз между током и напряжением, который в данном случае носит название **коэффициента мощности**.

Рис. 205. Треугольник мощностей

$$\cos \varphi = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}. \quad (223)$$

Так как $U = IZ$ и $\cos \varphi = \frac{r}{Z}$, то формуле (222) можно придать такой вид:

$$P_a = IZ \frac{r}{Z},$$

или, иначе,

$$P_a = I^2 r, \quad (224)$$

т. е. активная мощность в цепи с индуктивностью и активным сопротивлением расходуется в активном сопротивлении ее.

Реактивная мощность P_r равна произведению реактивной составляющей напряжения U_L на величину тока I :

$$P_r = U_L I.$$

Из треугольника напряжений имеем: $U_L = U \cdot \sin \varphi$, а поэтому реактивную мощность можно выразить следующей формулой:

$$P_r = UI \cdot \sin \varphi, \quad (225)$$

где U — напряжение в вольтах;

I — ток в амперах;

P_r — реактивная мощность в вольт-амперах реактивных (*вар*).

Полная мощность P_i равна произведению напряжения U на величину тока I :

$$P_i = UI. \quad (226)$$

Полная мощность в отличие от реактивной, измеряемой вольт-амперами реактивными (*вар*), измеряется просто вольт-амперами (*ва*).

Из треугольника мощностей находим соотношение между полной мощностью P_i , активной мощностью P_a и реактивной мощностью P_r :

$$P_i = \sqrt{P_a^2 + P_r^2}, \quad (227)$$

т. е. полная мощность, развиваемая током в цепи с активным сопротивлением и индуктивностью, равняется корню квадратному из суммы квадратов активной и реактивной мощностей.

На рис. 204 показаны заштрихованные площадки, ограниченные осью времени и графиком мгновенной мощности p . Площадки, расположенные выше оси времени, пропорциональны положительной энергии, т. е. той энергии, которая за соответствующий отрезок времени поступает от генератора электрической энергии в катушку (в цепь), а площадки, расположенные ниже

оси времени, пропорциональны отрицательной энергии, т. е. той энергии, которая за определенные отрезки времени возвращается из магнитного поля катушки к генератору. Разность площадей представляет собой площадку, пропорциональную той энергии, которая за один период расходуется в активном сопротивлении цепи на необратимые процессы.

Пример 116. Катушка с активным сопротивлением $r = 80$ ом и индуктивным сопротивлением $\omega L = 60$ ом подключена к зажимам с напряжением $U = 120$ в. Определить ток в цепи, угол сдвига фаз тока и напряжения, коэффициент мощности, полную, активную и реактивную мощности и энергию, затрачиваемую в цепи за один период, если угловая частота тока $\omega = 1000 \frac{1}{\text{сек}}$.

Решение. Полное сопротивление катушки

$$Z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{80^2 + 60^2} = 100 \text{ ом.}$$

Ток в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{120}{100} = 1,2 \text{ а.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{80}{100} = 0,8.$$

Угол сдвига фаз находим по таблицам косинусов.

Для $\cos \varphi = 0,8$ $\varphi = 36^\circ 50'$.

Полная мощность

$$P_t = UI = 120 \cdot 1,2 = 144 \text{ в а.}$$

Активная мощность

$$P_a = UI \cdot \cos \varphi = 120 \cdot 1,2 \cdot 0,8 = 115,2 \text{ в т.}$$

Реактивная мощность

$$P_r = UI \cdot \sin \varphi = 120 \cdot 1,2 \cdot 0,6 = 86,4 \text{ в а.}$$

Период переменного тока

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2 \cdot 3,14}{1000} = 0,00628 \text{ сек.}$$

Энергия, расходуемая в цепи за время одного периода T , равна

$$W = P_a T = 115,2 \cdot 0,00628 \approx 0,725 \text{ дж.}$$

Напряжение, теряемое в активном сопротивлении,

$$U_a = Ir = 1,2 \cdot 80 = 96 \text{ в.}$$

Напряжение, теряемое в индуктивном сопротивлении,

$$U_L = I\omega L = 1,2 \cdot 60 = 72 \text{ в.}$$

§ 105. ЦЕПЬ С НЕСКОЛЬКИМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ АКТИВНЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ И ИНДУКТИВНОСТЯМИ

Две катушки индуктивности, обладающие активными сопротивлениями r_1 и r_2 и индуктивностями L_1 и L_2 , соединены последовательно (рис. 206). В этой цепи проходит переменный синусоидальный ток

$$i = I_m \cdot \sin \omega t.$$

Напряжение U , приложенное к цепи, расходуется в двух активных сопротивлениях ($U_{a1} = Ir_1$ и $U_{a2} = Ir_2$) и двух реактивных сопротивлениях ($U_{L1} = I\omega L_1$ и $U_{L2} = I\omega L_2$).

Для того чтобы по этим четырем составляющим напряжения определить результирующее напряжение U , надо U_{a1} , U_{a2} , U_{L1} и U_{L2} сложить геометрически на векторной диаграмме.

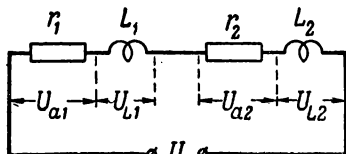


Рис. 206. Цепь переменного тока с последовательно соединенными активными сопротивлениями и индуктивностями

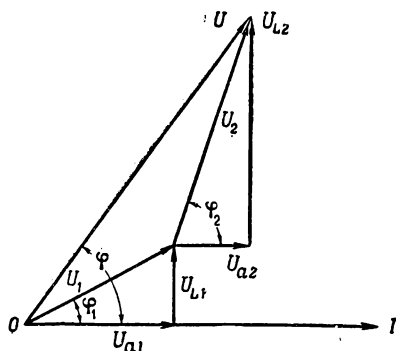


Рис. 207. Векторная диаграмма для цепи с последовательно соединенными активными сопротивлениями и индуктивностями

Отложим вектор тока I по горизонтали, так как начальная фаза тока по условию равна нулю (рис. 207). Напряжение $U_{a1} = Ir_1$ совпадает по фазе с током I , так как оно приложено к активному сопротивлению r_1 , а поэтому вектор U_{a1} отложим в направлении вектора тока I . Напряжение $U_{L1} = I\omega L_1$ опережает ток I по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$, так как оно приложено к участку цепи, обладающему только индуктивным сопротивлением ωL_1 , а поэтому вектор U_{L1} отложим в направлении, перпендикулярном вектору I , вверх из конца вектора U_{a1} . Сложив геометрически векторы U_{a1} и U_{L1} , получим действующее значение напряжения U_1 , приложенного к первой катушке.

Напряжение U_{a2} совпадает по фазе с током I , так как оно приложено к активному сопротивлению r_2 , а поэтому вектор U_{a2} отложим параллельно вектору тока I , приложив его к вектору U_1 . Напряжение U_{L2} опережает ток I по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$,

так как оно приложено к участку цепи, где имеется только индуктивное сопротивление ωL_2 , а поэтому вектор U_{L_2} отложим на векторной диаграмме в направлении, перпендикулярном вектору I , вверх, приложив его к концу вектора U_{a_2} . Сложив геометрически векторы U_{a_2} и U_{L_2} , получим действующее значение напряжения U_2 , приложенного ко второй катушке.

Сложив геометрически напряжения U_1 и U_2 , получим результирующее напряжение U , приложенное ко всей цепи. Выделим из векторной диаграммы треугольник напряжений (рис. 208),

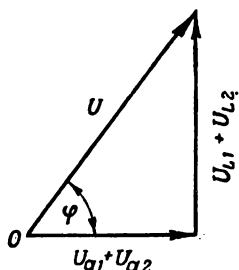


Рис. 208. Треугольник напряжений

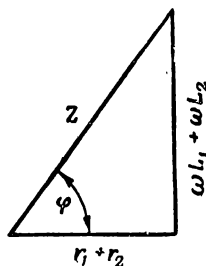


Рис. 209. Треугольник сопротивлений

у которого один катет равен сумме напряжений U_{a_1} и U_{a_2} , а второй — сумме напряжений U_{L_1} и U_{L_2} .

Согласно теореме Пифагора

$$U = \sqrt{(U_{a_1} + U_{a_2})^2 + (U_{L_1} + U_{L_2})^2}. \quad (228)$$

Разделив все стороны треугольника напряжений на величину тока I , получим треугольник сопротивлений (рис. 209), из которого найдем

$$Z = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (\omega L_1 + \omega L_2)^2}, \quad (229)$$

где Z — полное сопротивление цепи в омах.

Из треугольника сопротивлений определяем $\operatorname{tg} \varphi$:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L_1 + \omega L_2}{r_1 + r_2} \quad (230)$$

и отсюда находим угол φ по таблицам тангенсов. Этот угол будет положительным, так как напряжение, приложенное к цепи, опережает по фазе ток. Его можно определить также и через $\cos \varphi$ из треугольника сопротивлений:

$$\cos \varphi = \frac{r_1 + r_2}{Z}.$$

Зная напряжение U и полное сопротивление цепи Z , можно определить величину тока I по формуле

$$I = \frac{U}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (\omega L_1 + \omega L_2)^2}}. \quad (231)$$

Формула (231) является математическим выражением закона Ома для цепи с последовательно соединенными катушками, обладающими индуктивностями и активными сопротивлениями.

Полная мощность, развиваемая током в цепи,

$$P_l = UI.$$

Активная мощность

$$P_a = UI \cdot \cos \varphi.$$

Реактивная мощность

$$P_r = UI \cdot \sin \varphi.$$

В общем случае, когда в цепи имеется несколько активных сопротивлений и индуктивностей, соединенных последовательно, величина тока в цепи определяется формулой

$$I = \frac{U}{\sqrt{(\Sigma r)^2 + (\Sigma \omega L)^2}},$$

где Σr — сумма всех активных сопротивлений цепи;

$\Sigma \omega L$ — сумма всех индуктивных сопротивлений цепи.

Пример 117. Последовательно соединены две катушки индуктивности, у которых активные сопротивления равны $r_1 = 4$ ом и $r_2 = 6$ ом, а индуктивные сопротивления соответственно равны $\omega L_1 = 2$ ом и $\omega L_2 = 6$ ом. Определить полное сопротивление цепи, величину тока, сдвиг фаз тока и напряжения и мощность, расходуемую в цепи, если напряжение U , приложенное к ней, равно 120 в.

Решение. Полное сопротивление в цепи

$$Z = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (\omega L_1 + \omega L_2)^2} = \sqrt{(4+6)^2 + (2+6)^2} = 12,8 \text{ ом.}$$

Величина тока в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{120}{12,8} = 9,4 \text{ а.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{4+6}{12,8} = 0,781.$$

Угол сдвига фаз определяем по таблице косинусов; для $\cos \varphi = 0,781$ $\varphi = 38^\circ 40'$.

Активная мощность

$$P_a = UI \cdot \cos \varphi = 120 \cdot 9,4 \cdot 0,781 = 880 \text{ вт.}$$

ГЛАВА XXI

ПРОСТАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЕМКОСТЬЮ И АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

§ 106. ПОДКЛЮЧЕНИЕ КОНДЕНСАТОРА К ИСТОЧНИКУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ С ПОСТОЯННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ И РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА ЧЕРЕЗ АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

1. Процесс заряда конденсатора

Допустим, что задана электрическая цепь, состоящая из последовательно соединенных активного сопротивления r и конденсатора, обладающего емкостью C . Индуктивность цепи будем считать настолько малой, что ею практически можно пренебречь ($L = 0$).

Подключим заданную цепь к источнику электрической энергии с постоянным напряжением U (рис. 210). Как только цепь замкнется, тотчас же в ней появится электрический ток i конденсатор начнет заряжаться. По мере того как будет протекать ток в цепи, электрические заряды на обкладках конденсатора начнут расти. На обкладке конденсатора, соединенной с положительным полюсом источника, будут накапливаться положительные заряды (недостаток электронов), а на обкладке, соединенной с отрицательным полюсом, — отрицательные заряды (избыток электронов). Эти заряды конденсатора создадут свое собственное электростатическое поле, направленное навстречу электрическому полю, заряжающему конденсатор.

Чем больше возрастают заряды конденсатора, тем больше их электростатическое поле, тем с большей силой оно противодействует полю источника электрической энергии и тем меньше становится зарядный ток в цепи. В момент, когда силы электростатического поля $E_{ст}$ сравняются с силами электрического поля E_0 источника тока:

$$|\bar{E}_0| = |\bar{E}_{ст}|,$$

электрический ток в цепи станет равным нулю ($t=0$). Это значит, что конденсатор зарядился полностью, т. е. напряжение на его обкладках U_C стало равным напряжению U на зажимах источника, зарядившего его, т. е.

$$U_C = U.$$

Электрический заряд конденсатора в этом случае достиг своей максимальной величины при заданных выше условиях:

$$Q = CU,$$

где Q — электрический заряд конденсатора в кулонах;

C — емкость конденсатора в фарадах;

U — напряжение на обкладках конденсатора в вольтах.

В начальный момент времени заряда конденсатора (при $t=0$), когда поля, противодействующего заряду конденсатора, еще нет из-за отсутствия зарядов на обкладках конденсатора, электрический зарядный ток в цепи максимальный и равен

$$i = I_0 = \frac{U}{r},$$

где $i = I_0$ — ток при $t=0$ в амперах;

U — напряжение источника электрической энергии в вольтах;

r — активное сопротивление цепи в омах.

Затем ток i в цепи начинает убывать, стремясь в конечном итоге к нулю.

Напряжение на обкладках конденсатора U_C в начальный момент времени (при $t=0$) заряда конденсатора равно нулю ($U_C = 0$) из-за отсутствия зарядов на его обкладках. Затем оно по мере поступления зарядов на обкладки конденсатора растет, стремясь в конечном итоге к величине напряжения на зажимах источника электрической энергии ($U_C = U$).

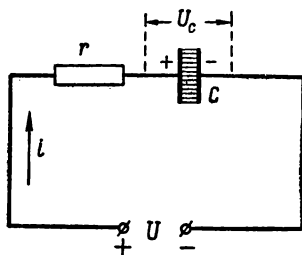


Рис. 210. Конденсатор заряжается от источника электрической энергии с постоянным напряжением

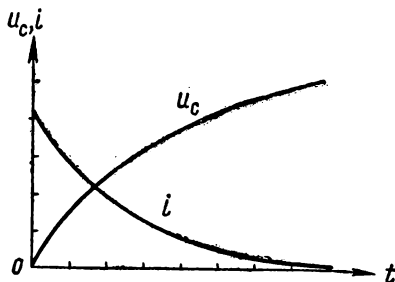


Рис. 211. Графики зависимости напряжения u_c и тока i от времени при заряде конденсатора от источника электрической энергии с постоянным напряжением

На рис. 211 приведены графики зависимости тока i и напряжения u_C от времени при заряде конденсатора от источника электрической энергии постоянным напряжением для случая, когда индуктивность цепи $L = 0$.

Чем больше емкость C и активное сопротивление r конденсатора, тем больше необходимо времени на заряд конденсатора. Чтобы судить о том, насколько быстро заряжается конденсатор, применяют величину, называемую постоянной времени (τ).

Постоянная времени τ — это отрезок времени, в течение которого, начиная от $t = 0$, зарядный ток уменьшается в $e = 2,718$ раз. Она определяется по формуле

$$\tau = rC, \quad (232)$$

где τ — постоянная времени цепи в секундах;

C — емкость конденсатора в фарадах;

r — активное сопротивление цепи в омах.

Пример 118. Определить постоянную времени цепи, имеющей емкость $C = 2$ мкф и активное сопротивление $r = 100$ ом.

Решение: Применяя формулу (232), находим

$$\tau = rC = 100 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 0,0002 \text{ сек.},$$

т. е. через две десятичные доли секунды зарядный ток уменьшится по сравнению с его начальным значением (при $t = 0$) в 2,718 раз.

Электрические заряды конденсатора создают в диэлектрике заряженного конденсатора электростатическое поле, которое обладает энергией, равной

$$W_0 = \frac{CU_C^2}{2},$$

где W_0 — энергия электростатического поля конденсатора в джоулях;

C — емкость конденсатора в фарадах;

U_C — напряжение на зажимах (обкладках) конденсатора в вольтах.

Эта энергия — потенциальная; она преобразуется в другие виды энергии при разряде конденсатора.

При заряде конденсатора источник электрической энергии отдает свою энергию не только непосредственно конденсатору (тот накапливает ее в своем электрическом поле), но и активному сопротивлению цепи, нагревая его. При этом, как показали расчеты, энергия источника всякий раз делится между ними поровну независимо от параметров r и C , т. е. коэффициент полезного действия при заряде конденсатора всегда равен 50%!

2. Разряд конденсатора

Если заряженный конденсатор отключить от источника электрической энергии и замкнуть на активное сопротивление r , то он может разряжаться (рис. 212).

В момент времени $t = 0$ (начальный момент разряда конденсатора) напряжение на его обкладках равно некоторому начальному напряжению U_0 , которое создает начальный разрядный ток, практически равный

$$i = I_0 = \frac{U_0}{r}.$$

Затем по мере разряда конденсатора начинает убывать его заряд, а вместе с ним и напряжение U_C на обкладках конденсатора; одновременно с этим уменьшается и величина разрядного тока i в цепи. На рис. 213 показан график изменения напряже-

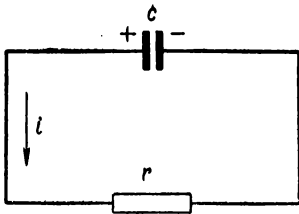


Рис. 212. Конденсатор разряжается через активное сопротивление

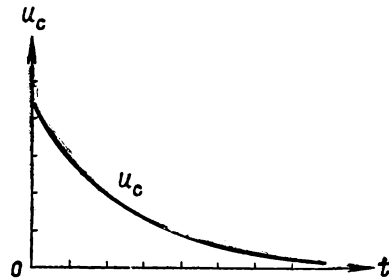


Рис. 213. График изменения напряжения u_C при разряде конденсатора через активное сопротивление

ния на зажимах конденсатора при его разряде через активное сопротивление. Графики изменения разрядного тока i и заряда конденсатора q аналогичны графику напряжения.

По мере разряда конденсатора постепенно исчезает его электрическое поле, отдавая свою энергию активному сопротивлению, которое преобразует ее в тепловую энергию.

Амперметр, включенный в цепь разряжающегося конденсатора, покажет наличие мгновенного разрядного тока. Стрелка прибора отклонится в сторону, противоположную той, в которую она отклонялась при заряде конденсатора, и затем вернется в нулевое положение.

Разряд конденсатора продолжается малые доли секунды. О быстроте разряда можно судить по постоянной времени, определяемой по формуле (232).

В заключение следует подчеркнуть, что постоянный ток не может проходить через конденсатор по той простой причине, что

диэлектрик конденсатора имеет сопротивление, измеряемое обычно миллионами или миллиардами омов. Например, пластинка слюды с площадью один квадратный сантиметр и толщиной один миллиметр имеет сопротивление для постоянного тока порядка десяти тысяч миллиардов омов.

§ 107. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЕМКОСТЬЮ

Если конденсатор подключить к источнику электрической энергии, обладающему синусоидальным напряжением (рис. 214), то в цепи пойдет переменный синусоидальный ток, который будет

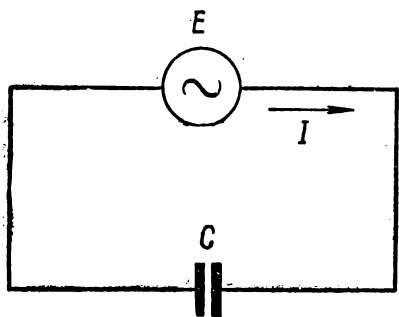


Рис. 214. Конденсатор в цепи переменного тока

длиться до тех пор, пока в цепи действует переменное синусоидальное напряжение. При этом вне обкладок конденсатора, т. е. в проводниках цепи, соединяющих конденсатор с источником электрической энергии, будет существовать переменный электрический ток проводимости, создаваемый движением свободных электронов этого участка цепи. Свободные электроны под влиянием сил переменного электрического поля

совершают колебания в цепи, перезаряжая обкладки конденсатора. В соответствии с этим заряд конденсатора и электрическое поле, создаваемое им в диэлектрике конденсатора, будут изменяться по синусоидальному закону. Под влиянием сил этого электрического поля в атомах диэлектрика происходит смещение электронов то в одну, то в другую, противоположную, сторону в зависимости от направления действия переменных сил поля. Это направленное колебательное движение электронов в атомах диэлектрика под влиянием сил переменного электрического поля является электрическим **током смещения** в диэлектрике конденсатора.

Ток смещения в диэлектрике обладает рядом свойств, присущих току проводимости, например магнитными, тепловыми и т. д. В рассматриваемом нами случае мы имеем в одном участке цепи (в металлических проводах) ток проводимости, а в другом (в диэлектрике конденсатора) — ток смещения. Однако и в этом случае ток в цепи замкнут на себя, так как ток смещения дополняет ток проводимости и совместно с ним образует замкнутые на себя линии тока.

Величина тока в диэлектрике в точности равна величине тока проводимости в подводящих проводах, соединяющих кон-

денсатор с источником электрической энергии, поскольку нити тока неразрывны.

Необходимо помнить, что природа переменного тока в диэлектрике конденсатора (ток смещения) отличается от природы тока в подводящих проводах (ток проводимости). Если бы через диэлектрик конденсатора прошел ток проводимости, то это завершилось бы пробоем диэлектрика, в результате чего конденсатор пришел бы в негодность. Незначительные же (в доли микроампера) токи проводимости, проходящие через диэлектрик (ток утечки конденсатора), обычно в расчет не принимаются.

Но так как в диэлектрике конденсатора есть ток смещения, то можно сказать, что переменный ток проходит через конденсатор. Если бы в нем почему-нибудь возник ток проводимости, то это значило бы, что в диэлектрике конденсатора возникло явление электрического пробоя.

Амперметр, включенный в цепь переменного тока с конденсатором, укажет на постоянное присутствие тока в цепи, величина которого зависит от приложенного напряжения, емкости конденсатора и частоты колебаний приложенного напряжения.

При наличии на зажимах конденсатора переменного напряжения величина заряда q конденсатора также переменная. Если за очень малый промежуток времени Δt заряд на обкладках конденсатора изменился на величину Δq , то мгновенное значение тока в цепи равно

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (233)$$

Но, как известно,

$$q = CU,$$

где q — электрический заряд конденсатора в кулонах;
 U — напряжение на обкладках конденсатора в вольтах;
 C — емкость конденсатора в фарадах.

С ростом заряда конденсатора растет и напряжение на его обкладках, поэтому

$$\Delta q = C\Delta u,$$

где Δq — приращение заряда в кулонах;
 Δu — приращение напряжения в вольтах.

Подставив выражение для Δq в формулу (233), получим

$$i = C \frac{\Delta u}{\Delta t}. \quad (234)$$

Из формулы (234) следует, что переменный ток в цепи с емкостью пропорционален скорости изменения приложенного к конденсатору напряжения.

Пусть к конденсатору приложено синусоидальное напряжение (рис. 215)

$$u = U_m \cdot \sin \omega t.$$

В первую четверть периода напряжение u нарастает в положительном направлении, и в соответствии с формулой (234) ток в цепи также должен быть положительным. Скорость изменения

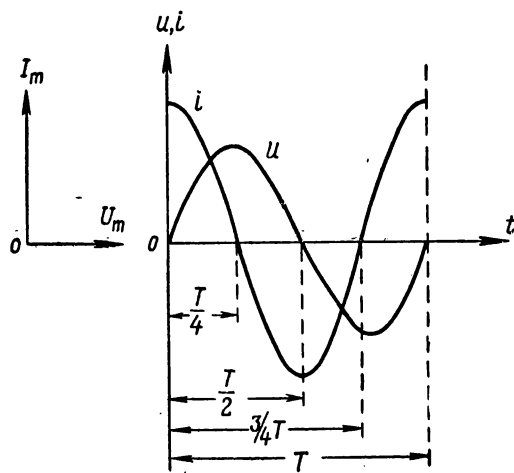


Рис. 215. Векторная и развернутая диаграммы тока и напряжения для цепи с емкостью

напряжения u наибольшая при переходе через нуль и равна нулю, когда напряжение равно максимуму. Следовательно, величина тока i , пропорциональная скорости изменения напряжения, должна иметь максимум при переходе напряжения через нулевое значение и равна нулю при переходе напряжения через максимум (см. рис. 215).

Во вторую четверть периода напряжение на зажимах источника электрической энергии уменьшается от максимального значения до

нуля; конденсатор разряжается, посылая ток навстречу приложенному к нему напряжению. Следовательно, убывающее напряжение источника продолжает оставаться положительным, а ток становится отрицательным и нарастает по мере увеличения скорости изменения напряжения. Когда напряжение будет проходить через нуль, Δu будет максимальным и ток в цепи достигнет максимального значения.

В третью четверть периода напряжение меняет свой знак, становясь отрицательным, и в то же время растет по абсолютной величине, достигая максимума. С момента перехода напряжения через нуль начинается перезаряд конденсатора и ток имеет одинаковый знак с напряжением, т. е. он отрицателен, сохраняя свой знак, который имел во вторую четверть периода. По мере увеличения напряжения u скорость его изменения падает и становится равной нулю, когда напряжение переходит свой максимум. А это значит, что в третьей четверти периода ток изменяется от максимума до нуля.

В четвертую четверть периода напряжение уменьшается по

абсолютной величине от максимума до нуля, конденсатор разряжается навстречу приложенному напряжению, т. е. при отрицательном напряжении ток становится положительным. По мере уменьшения напряжения скорость изменения его растет и в соответствии с этим растет величина разрядного тока, изменяясь от нуля до максимума.

Сопоставив развернутые диаграммы тока i в цепи с конденсатором и напряжения u , приложенного к конденсатору (рис. 215), нетрудно видеть, что ток i опережает по фазе напряжение u на угол $\frac{\pi}{2}$, т. е. на четверть периода.

Следовательно, если мгновенное значение напряжения, приложенного к конденсатору, определяется по формуле

$$u = U_m \cdot \sin \omega t,$$

то мгновенное значение тока будет определяться формулой

$$i = I_m \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (235)$$

Как известно, величина тока в цепи с конденсатором пропорциональна скорости изменения напряжения u на зажимах конденсатора, т. е.

$$i = C \frac{\Delta u}{\Delta t}, \quad (236)$$

а это значит, что величина тока в цепи с конденсатором при неизменной емкости последнего пропорциональна частоте приложенного к конденсатору напряжения, так как чем больше эта частота, тем больше скорость изменения напряжения во времени.

Величина тока в цепи с конденсатором зависит и от емкости конденсатора: чем больше емкость, тем больше при прочих равных условиях величина тока в цепи с конденсатором.

Следовательно, **величина тока в цепи с конденсатором пропорциональна частоте напряжения и емкости конденсатора.** В соответствии с этим действующее значение тока

$$I = \omega C U, \quad (237)$$

где I — действующее значение тока в амперах;
 U — действующее значение напряжения в вольтах;
 C — емкость в фарадах;
 ω — угловая частота.

Помножив левую и правую части равенства на $\sqrt{2}$, получим выражение для амплитуды тока:

$$\sqrt{2} I = \sqrt{2} \omega C U,$$

или, иначе,

$$I_m = \omega C U_m, \quad (238)$$

где I_m — амплитуда тока;
 U_m — амплитуда напряжения.

В соответствии с этой формуле (235) можно придать такой вид:

$$i = \omega C U_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

где i — мгновенное значение тока.

Преобразовав выражение (237), получим формулу закона Ома для чисто емкостной цепи:

$$I = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}}, \quad (239)$$

где I — действующее значение тока;
 U — действующее значение напряжения.

Величина $\frac{1}{\omega C}$ представляет собой емкостное сопротивление конденсатора и обычно обозначается символом x_C :

$$x_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (240)$$

где x_C — емкостное сопротивление в омах;
 C — емкость конденсатора в фарадах;
 ω — угловая частота в $\frac{1}{\text{сек}}$.

Емкостное сопротивление конденсатора — это не сопротивление диэлектрика конденсатора прохождению через него тока проводимости, которое обычно измеряется многими миллионами или миллиардами ом. Емкостное сопротивление конденсатора обусловлено противодействием электрического поля диэлектрика конденсатора, которое направлено навстречу электрическому полю источника электрической энергии, осуществляющему перезаряд конденсатора. В результате этого все напряжение U , приложенное к конденсатору, целиком компенсируется электродвижущей силой E_C конденсатора, т. е. $|U| = |E_C|$. Но, с другой стороны, согласно формуле (239) $U = I \cdot \frac{1}{\omega C}$, т. е. напряжение, приложенное к конденсатору, расходуется на преодоление емкостного сопротивления конденсатора. Следовательно,

$$|U| = |E_C| = I \cdot \frac{1}{\omega C}.$$

Отсюда мы можем сделать вывод, что емкостное сопротивление конденсатора обусловлено противодействием электродвижущей силы конденсатора.

Из двух конденсаторов, внутри которых протекает одинаковый синусоидальный ток, большим емкостным сопротивлением обладает тот, в котором возникает большая электродвижущая сила.

Из формулы (240) следует, что емкостное сопротивление конденсатора обратно пропорционально угловой частоте ω напряжения, приложенного к конденсатору, и емкости C конденсатора.

На рис. 216 приведен график зависимости емкостного сопротивления конденсатора от угловой частоты.

Если угловая частота $\omega = 0$, т. е. напряжение, приложенное к конденсатору, постоянно, то емкостное сопротивление конденсатора равно бесконечности ($x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{0 \cdot C} = \frac{1}{0} = \infty$). Это понятно, так как при постоянном напряжении, приложенном к конденсатору, ток в конденсаторе равен нулю. Наоборот, если угловая частота стремится к бесконечности ($\omega \rightarrow \infty$), то емкостное сопротивление конденсатора стремится к нулю ($x_C = \frac{1}{\infty \cdot C} = \frac{1}{\infty \cdot C} = 0$).

Пример 119. К цепи, состоящей из конденсатора емкостью $G = 0,1$ мкф, приложено синусоидальное напряжение $U = 42,3 \cdot \sin 10^5 t$. Определить величину мгновенного и действующего тока в цепи, если активным сопротивлением цепи можно пренебречь.

Решение. Емкостное сопротивление

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{10^5 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6}} = 100 \text{ ом.}$$

Мгновенное значение тока

$$i = \frac{42,3}{100} \cdot \sin \left(10^5 t + \frac{\pi}{2} \right) = 0,423 \cdot \sin \left(10^5 t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Действующее значение тока

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{0,423}{1,41} = 0,3 \text{ а.}$$

Мгновенная мощность p , развиваемая током в конденсаторе, равна произведению мгновенного значения напряжения (u) и мгновенного значения тока (i), т. е.

$$p = ui = U_m \cdot \sin \omega t I_m \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (241)$$



Рис. 216. Графики зависимости емкостного сопротивления конденсатора от угловой частоты

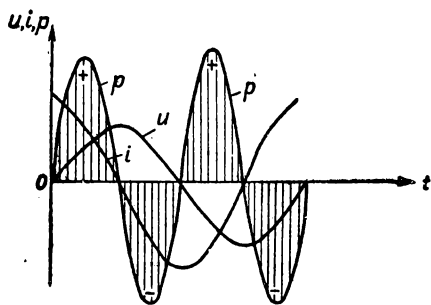


Рис. 217. График изменения мгновенной мощности для цепи с емкостью

После некоторых преобразований, аналогичных приведенным § 103, получим:

$$p = UI \cdot \sin 2\omega t, \quad (242)$$

т. е. мгновенная мощность — величина синусоидальная, изменяющаяся с двойной частотой по сравнению с частотой тока (напряжения).

На рис. 217 приведен график мгновенной мощности вместе с развернутыми диаграммами тока и напряжения для рассматриваемого нами случая.

Среднее значение мощности за период равно нулю:

$$P_{\text{ср}} = 0,$$

так как все положительные значения мгновенной мощности при суммировании со всеми отрицательными значениями ее дают нуль.

Средняя мощность, потребляемая конденсатором за период, равна нулю. Это значит, что конденсатор при отсутствии активного сопротивления энергию не потребляет.

В то время, когда мощность положительна (первая и третья четверти периода), конденсатор берет энергию от источника, запасая ее в электрическом поле диэлектрика:

$$W_0 = \frac{CU_m^2}{2},$$

где W_0 — энергия электрического поля конденсатора в джоулях;

C — емкость конденсатора в фарадах;

U_m — максимальное значение напряжения, приложенного к конденсатору, в вольтах.

Когда же мгновенная мощность отрицательна (вторая и четвертая четверти периода), конденсатор сам как бы становится источником электрической энергии, возвращая ее из электрического поля источнику и облегчая работу последнего.

Заштрихованные площадки, ограниченные осью времени и графиком мгновенной мощности (см. рис. 217), дают представление о движении энергии в цепи с конденсатором, где активное сопротивление r равно нулю. Площадки, расположенные выше линии времени, определяют положительную энергию, поступающую из источника в конденсатор, а площадки, расположенные ниже этой линии, — отрицательную энергию, возвращаемую конденсатором

источнику. Следовательно, конденсатор не потребляет энергии источника.

Емкостное сопротивление в отличие от активного является реактивным и называется **реактивным емкостным сопротивлением**.

Мощность, развиваемая током в цепи с конденсатором, активным сопротивлением которого можно пренебречь, является **реактивной мощностью**. Величина ее равна амплитуде в выражении для мгновенного значения мощности, т. е.

$$P_r = UI, \quad (243)$$

где P_r — реактивная мощность в вольт-амперах реактивных (*вар*);

U — напряжение в вольтах;

I — ток в амперах.

Активная мощность в данном случае равна нулю, так как

$$P_a = I^2 r = I^2 \cdot 0 = 0.$$

§ 108. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЕМКОСТЬЮ И АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Допустим, что в цепи, состоящей из последовательно соединенных емкости C и активного сопротивления r (рис. 218), проходит переменный синусоидальный ток

$$i = I_m \cdot \sin \omega t.$$

Напряжение U , приложенное к данной цепи, расходуется в двух сопротивлениях: активном r и емкостном $\frac{1}{\omega C}$.

В активном сопротивлении мгновенное значение напряжения равно

$$u_a = I_m r \cdot \sin \omega t.$$

В емкостном сопротивлении мгновенное значение напряжения равно

$$u_c = I_m \frac{1}{\omega C} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Мгновенное значение напряжения, приложенного ко всей цепи, равно алгебраической сумме мгновенных значений напряжений на активном и емкостном сопротивлениях:

$$\begin{aligned} u &= u_a + u_c = \\ &= I_m r \cdot \sin \omega t + I_m \frac{1}{\omega C} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \end{aligned}$$

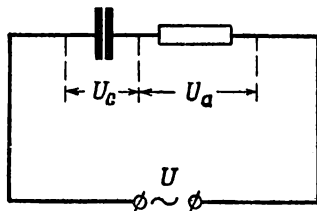


Рис. 218. Цепь переменного тока с последовательно соединенными активным сопротивлением и емкостью

Так как слагаемые здесь — синусоидальные величины одинаковой частоты, то результирующее их напряжение также должно быть синусоидальным и иметь ту же частоту ω , что и слагаемые напряжения. А это значит, что для определения действующего значения напряжения, приложенного к данной цепи, можно на векторной диаграмме геометрически сложить действующие значения напряжений:

1) $U_a = Ir$ — падение напряжения в активном сопротивлении;

2) $U_c = I \frac{1}{\omega C}$ — падение напряжения в емкостном сопротивлении.

Отложим вектор тока I на векторной диаграмме по горизонтальному направлению, так как по условию начальная фаза тока равна нулю (рис. 219). Напряжение U_a совпадает по фазе с то-

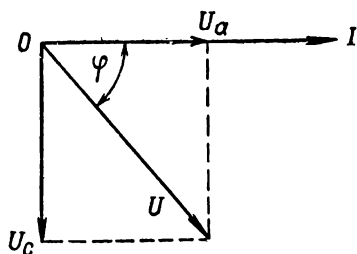


Рис. 219. Векторная диаграмма тока и напряжения для цепи с последовательно соединенными активным сопротивлением и емкостью

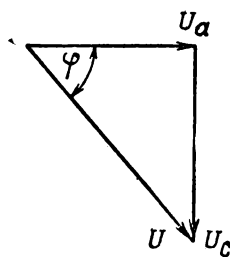


Рис. 220. Треугольник напряжений

ком, а поэтому вектор U_a отложим на векторной диаграмме в направлении вектора I . Напряжение U_c отстает по фазе от тока I на угол $\frac{\pi}{2}$, так как оно приложено к участку цепи, обладающему только емкостным сопротивлением, а поэтому вектор U_c отложим в направлении, перпендикулярном вектору I , и вниз, т. е. на угол $\frac{\pi}{2}$ по часовой стрелке.

Сложив геометрически U_a и U_c , получим действующее значение результирующего напряжения U , приложенного ко всей цепи. Выделим из векторной диаграммы прямоугольный треугольник напряжений, составленный из векторов U_a , U_c и U (рис. 220).

Применяя теорему Пифагора, из треугольника напряжений находим соотношение между U_a , U_c и U :

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_c^2}. \quad (244)$$

Пример 120. Напряжение на зажимах конденсатора $U_C = 80$ в, а на зажимах активного сопротивления, соединенного последовательно с конденсатором, $U_a = 60$ в. Определить напряжение, приложенное ко всей цепи.

Решение. По формуле (244) находим

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_C^2} = \sqrt{60^2 + 80^2} = 100 \text{ в.}$$

Разделив все стороны треугольника напряжений на величину тока I , получим треугольник сопротивлений (рис. 221). Из этого треугольника найдем

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (245)$$

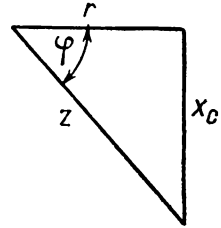


Рис. 221. Треугольник сопротивлений

где Z — полное сопротивление в омах;
 r — активное сопротивление в омах;
 $\frac{1}{\omega C}$ — емкостное сопротивление в омах.

Пример 121. Конденсатор при некоторой заданной частоте имеет емкостное сопротивление $\frac{1}{\omega C} = 45$ ом, а последовательно соединенное с ним активное сопротивление $r = 25$ ом.

Определить полное сопротивление цепи.

Решение. По формуле (245) находим

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{25^2 + 45^2} = 51,5 \text{ ом.}$$

Зная полное напряжение, приложенное к цепи, и полное сопротивление ее, можно определить ток в цепи по формуле

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (246)$$

Формула (246) является математическим выражением закона Ома для цепи с емкостью и активным сопротивлением, соединенными последовательно.

Пример 122. Определить ток в цепи с активным сопротивлением $r = 60$ ом и емкостью $C = 100$ мкф, соединенными последовательно, если частота тока $f = 50$ гц и напряжение, приложенное во всей цепи, $U = 120$ в.

Решение. Емкостное сопротивление цепи равно

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 31,8 \text{ ом.}$$

Ток в цепи

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{120}{\sqrt{60^2 + 31,8^2}} = \frac{120}{68} = 1,76 \text{ а.}$$

Из треугольника сопротивлений находим угол φ по тангенсу φ

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega C r}. \quad (247)$$

Так как напряжение отстает от тока по фазе на угол φ , то последний отрицателен, и его надо отложить на векторной диаграмме в сторону вращения часовой стрелки от вектора тока I .

Таким образом, если

$$i = I \cdot \sin \omega t,$$

то

$$u = U_m \cdot \sin (\omega t - \varphi).$$

Мгновенная мощность, развиваемая током в цепи, равна $p = ui = U_m \cdot \sin (\omega t - \varphi) I_m \cdot \sin \omega t$ и не является синусоидальной величиной.

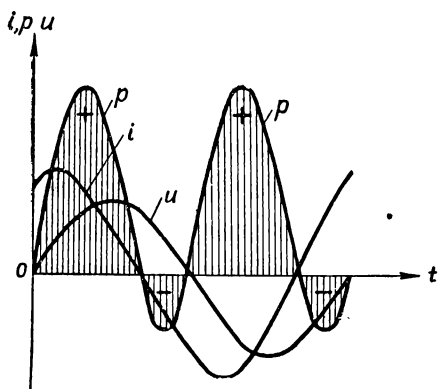


Рис. 222. График изменения мгновенной мощности в цепи с последовательно соединенными r и C

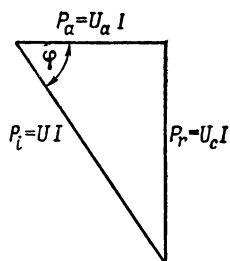


Рис. 223. Треугольник мощностей

На рис. 222 показаны развернутые диаграммы тока i и напряжения u , а также график мгновенной мощности p для рассматриваемого случая последовательного соединения активного сопротивления r и емкости C .

Умножив все стороны треугольника напряжений (рис. 220) на величину тока I , получим треугольник мощностей (рис. 223).

Из треугольника мощностей находим:

1) активная мощность в цепи равна

$$P_a = U_a I = UI \cdot \cos \varphi = I^2 r, \quad (248)$$

2) реактивная мощность в цепи равна

$$P_r = U_c I = UI \cdot \sin \varphi; \quad (249)$$

3) полная мощность в цепи равна

$$P_i = \sqrt{P_a^2 + P_r^2} = UI, \quad (250)$$

где P_a — активная мощность в ваттах;
 P_r — реактивная мощность в вольт-амперах реактивных (*вар*);
 P_i — полная мощность в вольт-амперах (*ва*);
 $\cos \varphi = \frac{r}{Z}$ — коэффициент мощности;
 U — напряжение в вольтах;
 I — ток в амперах.

Положительная энергия, т. е. та, которая поступает от источника к конденсатору, соединенному последовательно с активным сопротивлением, больше, чем отрицательная энергия, которую конденсатор возвращает источнику.

Разность этих количеств энергии есть как раз та энергия, которая поглощается в активном сопротивлении цепи. На рис. 222 показаны площадки, ограниченные графиком мгновенной мощности и осью времени. Площадки, расположенные выше оси времени, определяют величину положительной энергии, а площадки, лежащие ниже этой линии, — величину отрицательной энергии.

Пример 123. Конденсатор, обладающий емкостью $C = 0,2$ мкф, соединен последовательно с активным сопротивлением $r = 400$ ом. Определить ток в цепи и мощность, расходуемую в цепи, если напряжение, приложенное к цепи, $U = 125$ в и угловая частота $\omega = 10\,000 \frac{1}{\text{сек}}$.

Решение. Емкостное сопротивление цепи равно

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{10\,000 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} = 500 \text{ ом.}$$

Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{r^2 + (x_C)^2} = \sqrt{400^2 + 500^2} = 640,3 \text{ ом.}$$

Ток в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{125}{640,3} = 0,195 \text{ а.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{400}{640,3} = 0,624.$$

Угол сдвига фаз тока и напряжения определим по $\operatorname{tg} \varphi$:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_C}{r} = \frac{500}{400} = 1,25 \text{ и } \varphi = 51^\circ 20'.$$

Полная мощность

$$P_i = UI = 125 \cdot 0,195 = 24,4 \text{ ва.}$$

Активная мощность

$$P_a = UI \cdot \cos \varphi = 125 \cdot 0,195 \cdot 0,624 = 15,4 \text{ вт.}$$

Если цепь составлена из нескольких последовательно соединенных активных сопротивлений и емкостей (рис. 224), то расчет режима в этой цепи аналогичен расчету цепи с несколькими активными сопротивлениями и индуктивностями, приведенному в § 105.

В этом случае эквивалентное активное сопротивление цепи равно

$$R_0 = r_1 + r_2 + \dots + r_n. \quad (251)$$

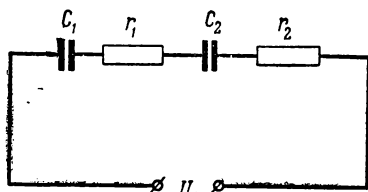


Рис. 224. Цепь переменного тока с последовательно соединенными активными сопротивлениями и емкостями

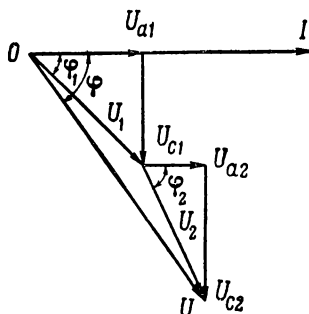


Рис. 225. Векторная диаграмма тока и напряжений для цепи с последовательно соединенными активными сопротивлениями и емкостями

Эквивалентное реактивное сопротивление цепи

$$x_{C_0} = \frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2} + \dots + \frac{1}{\omega C_n}. \quad (252)$$

Полное сопротивление цепи

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + x_{C_0}^2}. \quad (253)$$

Действующее значение тока

$$I = \frac{U}{Z}. \quad (254)$$

Угол сдвига фаз между током и напряжением можно определить по тангенсу этого угла:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_{C_0}}{R_0}. \quad (255)$$

На рис. 225 приведена векторная диаграмма тока и напряжений для цепи с последовательно соединенными активными сопротивлениями и емкостями.

Пример 124. Цепь переменного тока состоит из последовательно соединенных сопротивлений $r_1 = 35 \text{ ом}$, $r_2 = 25 \text{ ом}$, $x_{C1} = 75 \text{ ом}$ и $x_{C2} = 45 \text{ ом}$.

Определить ток в цепи, сдвиг фаз напряжения и тока и активную мощность, если напряжение U , приложенное к цепи, равно 125 в.

Решение. По формуле (253) находим полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_{C1} + x_{C2})^2} = \sqrt{(35 + 25)^2 + (75 + 45)^2} = \\ = 134,2 \text{ ом.}$$

Ток в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{125}{134,2} = 0,935 \text{ а.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{r_1 + r_2}{Z} = \frac{60}{134,2} = 0,446, \text{ угол } \varphi = 63^\circ 31'.$$

Активная мощность

$$P_a = I^2 (r_1 + r_2) = 0,935^2 (35 + 25) = 52,5 \text{ вт.}$$

ГЛАВА XXII

ПРОСТАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ ИНДУКТИВНОСТЬЮ, ЕМКОСТЬЮ И АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

§ 109. КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ И АПЕРИОДИЧЕСКИЙ РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА

I. Собственные незатухающие колебания в контуре

Допустим, что имеется электрическая цепь, в которой можно осуществить заряд конденсатора от источника электрической энергии с постоянным напряжением U , а затем и разряд его через катушку индуктивности (рис. 226). Конденсатор обладает емкостью C , а катушка — индуктивностью L . Активное сопротивление катушки будем вначале считать практически равным нулю, т. е. возьмем идеальный случай разряда конденсатора.

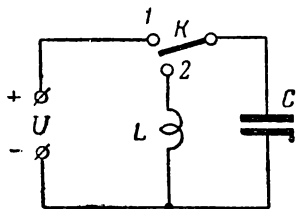


Рис. 226. Схема цепи для заряда конденсатора и последующего его разряда через катушку индуктивности

Если переключатель K поставить в положение 1 , то конденсатор начнет заряжаться. Заряд будет продолжаться до тех пор, пока напряжение на обкладках конденсатора не станет равным напряжению на зажимах источника электрической энергии.

В результате заряда конденсатора в его электрическом поле накопится потенциальная электрическая энергия, равная

$$W_{эм} = \frac{CU_m^2}{2}, \quad (256)$$

где $W_{эм}$ — энергия электрического поля конденсатора в джоулях;
 U_m — конечное (максимальное) напряжение на обкладках конденсатора в вольтах;
 C — емкость конденсатора в фарадах.

После того как конденсатор зарядится полностью до максимального напряжения U_m , отключим его от источника электрической энергии и в момент $t = 0$ присоединим к катушке индуктивности L . Как только цепь, состоящая из последовательно соединенных конденсатора и катушки индуктивности, будет замкнута, конденсатор начнет разряжаться.

Возникший в обмотке катушки разрядный ток конденсатора создаст в катушке магнитное поле, которое будет нарастать по мере увеличения тока.

Изменяющееся во времени магнитное поле индуцирует в обмотке катушки электродвижущую силу самоиндукции, которая согласно правилу Ленца противодействует нарастанию тока (рис. 227).

Силы электрического поля конденсатора, перемещая электрические заряды по цепи, преодолевают сопротивление сил индукционного электрического поля, так как напряжение на обкладках конденсатора и электродвижущая сила самоиндукции направлены навстречу друг другу. При этом силы электрического поля конденсатора совершают работу, в результате чего энергия электрического поля конденсатора переходит в энергию магнитного поля катушки.

Благодаря противодействию нарастанию тока со стороны электродвижущей силы самоиндукции разрядный ток конденсатора изменяется плавно, без скачков.

По мере разряда конденсатора его разрядный ток все более возрастает и с ним вместе растет энергия магнитного поля катушки за счет убыли энергии исчезающего электрического поля конденсатора.

В момент времени, когда конденсатор разрядится полностью, т. е. когда его заряд и напряжение на его зажимах станут равными нулю, электрическое поле конденсатора целиком преобразуется в магнитное поле катушки. Ток в цепи в этот момент достигнет максимального значения I_m , а магнитное поле тока запасет в себе максимальное количество энергии, равное

$$W_{m\ m} = \frac{LI_m^2}{2}, \quad (257)$$

где $W_{m\ m}$ — энергия магнитного поля катушки в джоулях;
 I_m — максимальное значение тока в амперах;
 L — индуктивность катушки в генри.

Так как в процессе разряда конденсатора энергия его электрического поля не расходовалась ни на какие необратимые про-

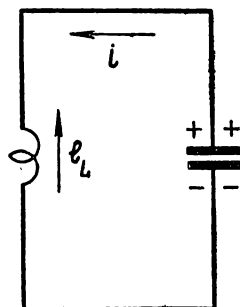


Рис. 227. Разрядный ток i и э. д. с. e_L направлены навстречу друг другу

цессы (например, на образование тепла в обмотке катушки), то вся она преобразовалась в энергию магнитного поля тока катушки индуктивности, т. е.

$$W_{\text{э} m} = W_{\text{м} m},$$

или, иначе,

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}.$$

Итак, в результате полного разряда конденсатора потенциальная энергия его электрического поля (энергия поля относительно неподвижных зарядов) преобразовалась в кинетическую энергию магнитного поля тока (энергию поля, обусловленного движущимися электрическими зарядами — током).

Но как только исчезло электрическое поле конденсатора, тотчас же начнут уменьшаться ток в цепи и его магнитное поле, так как исчезли силы, создающие и поддерживающие этот ток.

Изменяющееся (исчезающее) магнитное поле опять начнет индуцировать электродвижущую силу самоиндукции. Однако на этот раз ее направление будет противоположным тому, которое она имела при разряде конденсатора, так как теперь она согласно правилу Ленца должна быть направлена одинаково с исчезающим током, противодействуя его убыванию. Теперь силы индукционного электрического поля будут действовать уже в направлении движения электрических зарядов, способствуя их перемещению в цепи. В результате начнется заряд конденсатора (рис. 228).

Электрические заряды, накапливающиеся на обкладках конденсатора, создают электрическое поле конденсатора, которое направлено навстречу индукционному электрическому полю, осуществляющему заряд конденсатора. Перемещая электрические заряды по цепи, силы индукционного электрического поля преодолевают противодействие сил электрического поля конденсатора и при этом совершают некоторую работу за счет энергии исчезающего магнитного поля.

По мере заряда конденсатора зарядный ток становится все меньше, а с ним вместе убывает и его магнитное поле, преобразуя свою энергию в энергию электрического поля конденсатора.

В момент времени, когда электрический ток в цепи станет равным нулю, магнитное поле его исчезнет, а вся энергия этого поля преобразуется в энергию электрического поля конденсатора. Конденсатор в этом случае полностью зарядится, и напряжение на его обкладках вновь станет равным U_m . Однако теперь полярность конденсатора изменилась по сравнению с предыдущей, так как обкладка конденсатора, которая при разряде была заряжена положительно, теперь заряжена отрицательно, а отрицательно заряженная обкладка — положительно.

Итак, в момент времени, когда ток в цепи стал равным нулю, энергия магнитного поля целиком перешла в энергию электрического поля конденсатора.

После того как ток в цепи стал равным нулю и магнитное поле его целиком преобразовалось в электрическое поле конденсатора, последний начинает вновь разряжаться. Как и при предыдущем разряде конденсатора, разрядный ток нарастает в цепи плавно, с ним вместе непрерывно растет его магнитное поле.

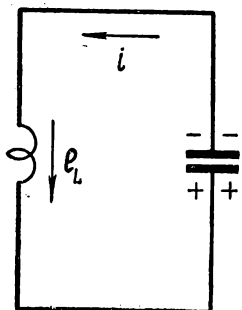


Рис. 228. Зарядный ток i и э. д. с. e_L направлены попутно друг с другом

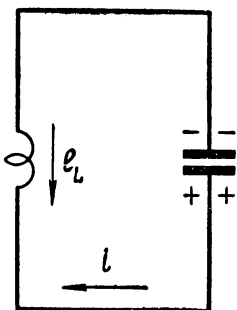


Рис. 229. Разрядный ток i и э. д. с. e_L направлены навстречу друг другу

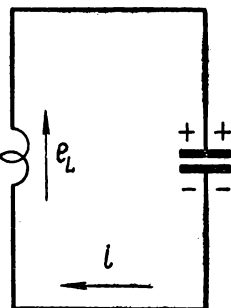


Рис. 230. Зарядный ток i и э. д. с. e_L направлены попутно друг с другом

Электродвижущая сила самоиндукции направлена навстречу нарастающему току, противодействуя его росту (рис. 229). Силы электрического поля конденсатора преодолевают сопротивление сил индукционного электрического поля и совершают работу. В результате энергия электрического поля конденсатора переходит в энергию магнитного поля тока. Когда конденсатор полностью разрядится, напряжение на его обкладках станет равным нулю, ток в цепи достигнет максимального значения, а электрическое поле конденсатора преобразуется в магнитное поле катушки, передав ему всю свою энергию.

Затем вновь будет происходить заряд конденсатора (рис. 230). Ток в цепи начнет убывать по мере заряда конденсатора. Силы индукционного электрического поля, перемещая электрические заряды по цепи, будут преодолевать сопротивление электрического поля заряжающегося конденсатора. Следовательно, силы индукционного электрического поля будут совершать работу, и при этом энергия магнитного поля тока катушки будет преобразовываться в энергию электрического поля конденсатора. Когда ток в цепи станет равным нулю, конденсатор полностью зарядится, напряжение на его обкладках достигнет максимальной величины U_m , а энергия магнитного поля тока катушки целиком преобразуется в энергию электрического поля конденсатора.

Таким образом, электрическое состояние конденсатора вернется к исходному, соответствующему моменту времени $t=0$, когда начался разряд. Следовательно, полный цикл перезаряда конденсатора закончился. Однако, как показывает опыт, перезаряд конденсатора будет повторяться периодически, т. е. через равные промежутки времени. Преобразование потенциальной энергии электрического поля конденсатора в кинетическую энергию магнитного поля тока катушки и обратно в данном идеальном случае будет продолжаться сколь угодно долго, так как по условию активное сопротивление цепи равно нулю, а поэтому потеря энергии на необратимые процессы здесь нет.

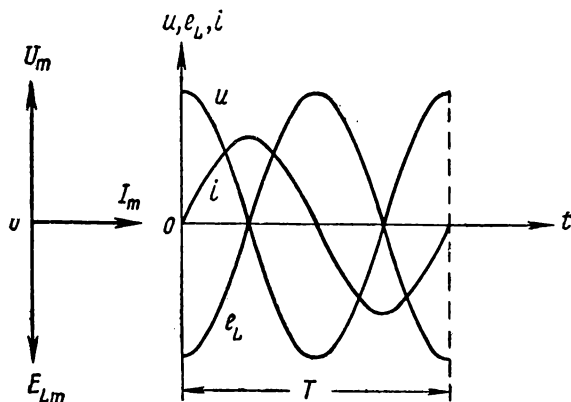


Рис. 231. Векторная и развернутая диаграммы напряжения u , э. д. с. e_L и тока i колебательного разряда конденсатора

Рассмотренный нами процесс разряда конденсатора называется незатухающим колебательным разрядом, так как амплитуда напряжения U_m на зажимах конденсатора, амплитуда тока I_m в цепи, а также максимальное значение энергии W_{em} электрического поля конденсатора и максимальное значение энергии W_{mm} магнитного поля катушки с течением времени остаются неизменными.

Как показывает математический анализ, незатухающий колебательный разряд конденсатора является электромагнитным процессом, изменяющимся во времени по синусоидальному закону; значит, напряжение на зажимах конденсатора, ток в цепи, электродвижущая сила — синусоидальные величины. На рис. 231 приведены векторная и развернутая диаграммы напряжения на зажимах конденсатора, тока и электродвижущей силы самоиндукции для случая незатухающего колебательного разряда конденсатора. Здесь мы видим, что ток в цепи изменяется по закону

$i = I_m \cdot \sin \omega t$, напряжение на зажимах конденсатора опережает по фазе ток на угол $\frac{\pi}{2}$ и изменяется по закону $u = U_m \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$, а электродвижущая сила самоиндукции отстает от тока по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$ и изменяется по закону $e_L = E_{Lm} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$.

Частота незатухающего колебательного разряда конденсатора называется частотой собственных незатухающих колебаний контура. Она зависит от емкости C конденсатора и индуктивности L катушки.

Определим частоту собственных незатухающих колебаний контура, исходя из условия равенства максимальных значений энергии электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки:

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (258)$$

Применяя известную нам формулу закона Ома для определения величины тока на участке цепи с конденсатором, активным сопротивлением которого можно пренебречь, найдем величину тока в конденсаторе, а следовательно, и в любом участке данной цепи, так как рассматриваемая нами цепь (контур) — последовательная:

$$I = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}},$$

где U — действующее значение напряжения на зажимах конденсатора;

I — действующее значение тока в конденсаторе (в цепи);

$\frac{1}{\omega C}$ — емкостное сопротивление цепи;

ω — угловая частота;

C — емкость конденсатора.

Помножив левую и правую части последнего равенства на $\sqrt{2}$, получим

$$I_m = U_m \omega C. \quad (259)$$

Подставив вместо I_m его выражение в формулу (258), получим

$$\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LU_m^2 \omega^2 C^2}{2},$$

или

$$1 = \omega^2 LC.$$

Отсюда получим формулу для определения угловой частоты собственных незатухающих колебаний контура:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (260)$$

В соответствии с этим частота собственных незатухающих колебаний контура равна

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (261)$$

и период собственных незатухающих колебаний контура равен

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (262)$$

где L — индуктивность в генри;

C — емкость в фарадах;

T — период в секундах;

f — частота в герцах.

Пример 125. Определить частоту собственных незатухающих колебаний в контуре, если индуктивность катушки $L = 4 \cdot 10^{-4}$ гн, емкость $C = 1,6 \cdot 10^{-9}$ ф и активное сопротивление $r = 0$.

Решение. Применяя формулу (260), найдем угловую частоту собственных незатухающих колебаний в контуре:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-9}}} = 1,25 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Частота собственных незатухающих колебаний в контуре равна

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1,25 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,14} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ гц.}$$

Период собственных незатухающих колебаний в контуре равен

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1,99 \cdot 10^5} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ сек.} = 5 \text{ мксек.}$$

Посмотрим, каковы величины индуктивного и емкостного сопротивлений в колебательном контуре при наличии в нем собственных незатухающих колебаний.

Индуктивное сопротивление

$$x_L = \omega L = \frac{1}{\sqrt{LC}} L = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Емкостное сопротивление

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{LC}} C} = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Следовательно, индуктивное и емкостное сопротивления колебательного контура при наличии в нем собственных незатухающих колебаний равны:

$$x_L = x_C = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Сопротивление, равное порознь индуктивному и емкостному сопротивлениям колебательного контура при наличии в нем собственных незатухающих колебаний, называется **волновым сопротивлением** ρ контура:

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (263)$$

где ρ — волновое сопротивление контура в омах;
 L — индуктивность в генри;
 C — емкость в фарадах.

Пример 126. Определить волновое сопротивление колебательного контура, если индуктивность контура $L = 9 \cdot 10^{-2}$ гн, а емкость $C = 4 \cdot 10^{-8}$ ф.

Решение. Применяя формулу (263), находим

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^{-8}}} = 1500 \text{ ом.}$$

Теперь посмотрим, по какому закону изменяется энергия электрического поля конденсатора и энергия магнитного поля катушки в колебательном контуре при наличии в нем собственных незатухающих колебаний.

Мгновенное значение энергии электрического поля конденсатора равно

$$W_э = \frac{CU^2}{2} = \frac{C \left[U_m \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \right]^2}{2} = \frac{CU_m^2 \cdot \cos^2 \omega t}{2}.$$

Мгновенное значение энергии магнитного поля катушки равно

$$W_m = \frac{Li^2}{2} = \frac{L (I_m \cdot \sin \omega t)^2}{2} = \frac{LI_m^2 \cdot \sin^2 \omega t}{2}.$$

Из полученных формул видно, что мгновенные значения энергий электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки несинусоидальны, так как они зависят соответственно от квадрата косуса и синуса угла ωt .

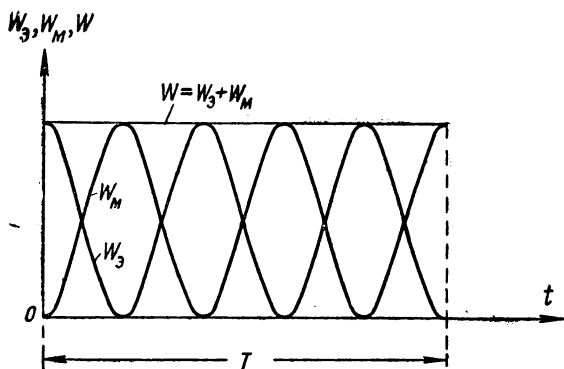


Рис. 232. Графики колебания энергии электрического $W_э$ и магнитного $W_м$ полей

Выясним, чему равна сумма мгновенных значений энергий электрического и магнитного полей для любого данного момента времени:

$$W = W_э + W_м = \frac{CU_m^2 \cdot \cos^2 \omega t}{2} + \frac{LI_m^2 \cdot \sin^2 \omega t}{2}.$$

Но так как $\frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}$, то

$$W = \frac{CU_m^2}{2} (\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t) = \frac{CU_m^2}{2}.$$

Следовательно,

$$W = W_э + W_м = \frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}, \quad (264)$$

т. е. сумма мгновенных значений энергии электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки в колебательном контуре при наличии в нем собственных незатухающих колебаний — величина постоянная, не зависящая от времени и равная порознь величинам максимальной энергии электрического поля и магнитного поля. Это понятно, так как энергия в контуре не теряется на необратимые процессы.

На рис. 232 приведены графики изменения во времени мгновенных значений энергии электрического и магнитного полей и суммарной величины этих мгновенных значений энергии в колебательном контуре при наличии в нем собственных незатухающих колебаний.

II. Собственные затухающие колебания в контуре

Теперь рассмотрим электромагнитные колебания в таком контуре, в котором активным сопротивлением пренебречь нельзя.

Допустим, что к конденсатору емкостью C , заряженному до напряжения U_m , подключается в момент времени $t = 0$ катушка, имеющая индуктивность L и активное сопротивление r (рис. 233).

Как только цепь, состоящая из конденсатора и катушки, будет замкнута, тотчас же начнется разряд конденсатора. Однако электромагнитный процесс разряда конденсатора уже будет носить иной характер по сравнению с тем, что наблюдалось при наличии в контуре собственных незатухающих колебаний. Теперь в контуре будут возникать потери энергии на необратимые процессы — на преобразование электрической энергии конденсатора не только в магнитную, но и тепловую, которая будет рассеиваться в окружающее пространство.

Если активное сопротивление контура меньше двойного волнового сопротивления его, т. е.

$$r < 2\rho = 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (265)$$

то разряд конденсатора носит колебательный характер. Однако эти колебания в отличие от собственных незатухающих колебаний представляют собой затухающие колебания контура. Это значит, что амплитуда U_m напряжения на зажимах конденсатора и амплитуда I_m тока в контуре закономерно уменьшаются с каждым новым периодом. Энергия, запасенная в электрическом поле конденсатора, расходуется в процессе колебательного разряда на тепловые потери в активном сопротивлении контура, а колебания в контуре спустя незначительное время после начала разряда конденсатора практически прекращаются (затухают).

Колебания подобного рода называются собственными затухающими колебаниями контура. Графически они изображаются кривой, называемой затухающей синусоидой (рис. 234).

Частота собственных затухающих колебаний контура зависит не только от индуктивности L , емкости C , но и от активного сопротивления r контура. Чем больше активное сопротивление контура, тем меньше при всех прочих равных условиях частота собственных затухающих колебаний контура.

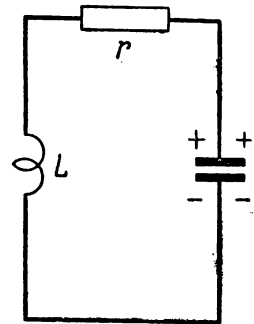


Рис. 233. Разряд конденсатора через цепь r и L

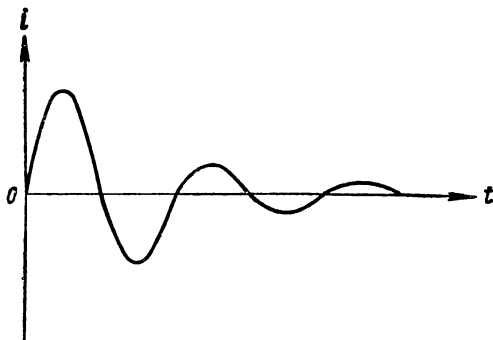


Рис. 234. Затухающая синусоида тока

Угловая частота собственных затухающих колебаний контура определяется по формуле

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{r^2}{4\rho^2}}, \quad (266)$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ — волновое сопротивление контура.

Из формулы (266) следует, что чем больше активное сопротивление контура, тем меньше угловая частота собственных затухающих колебаний контура.

Если активное сопротивление контура равно нулю, то

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

т. е. угловая частота собственных колебаний контура становится максимальной возможной при заданных значениях L и C ; в то же время это будет уже частота собственных незатухающих колебаний контура.

Пример 127. Определить угловую частоту, частоту и период собственных затухающих колебаний в контуре, если известно, что индуктивность $L = 0,01$ гн, емкость $C = 1$ мкф и активное сопротивление контура $r = 100$ ом.

Решение. Применяя формулу (266), находим угловую частоту собственных затухающих колебаний контура:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{r^2}{4\rho^2}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{r^2}{4 \frac{L}{C}}} = \frac{1}{\sqrt{0,01 \cdot 10^{-6}}} \sqrt{1 - \frac{100^2}{4 \cdot \frac{0,01}{10^{-6}}}} \\ &= 10^4 \sqrt{1 - 0,25} = 8,65 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{сек}}. \end{aligned}$$

Частота собственных затухающих колебаний равна

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{8,65 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14} = 1,38 \cdot 10^3 \text{ гц.}$$

Период собственных затухающих колебаний равен

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1,38 \cdot 10^3} = 7,25 \cdot 10^{-4} \text{ сек.}$$

Степень затухания колебаний в контуре зависит от величины потерь в нем энергии на образование тепла в активном сопротивлении. Следовательно, чем больше активное сопротивление контура, тем при прочих равных условиях интенсивнее будет происходить затухание колебаний в контуре.

Интенсивность затухания колебаний в контуре характеризуется величиной, называемой **затуханием контура**.

Затухание контура численно равно отношению активного сопротивления к волновому сопротивлению контура:

$$d = \frac{r}{\rho} = \frac{r}{\sqrt{\frac{L}{C}}}, \quad (267)$$

где d — затухание контура;

r — активное сопротивление контура в омах;

ρ — волновое сопротивление контура в омах.

Величина, обратная затуханию контура, называется **качеством (добротностью) контура**:

$$Q = \frac{1}{d}, \quad (268)$$

где Q — качество контура;
 d — затухание контура.

Чем выше качество контура, тем менее интенсивно затухают собственные колебания в контуре. На рис. 235 для сравнения приведены графики собственных затухающих колебаний при различных значениях качества (добротности) контура и график собственных незатухающих колебаний его.

В радиотехнике обычно стремятся к тому, чтобы качество контура было высоким, т. е. чтобы в

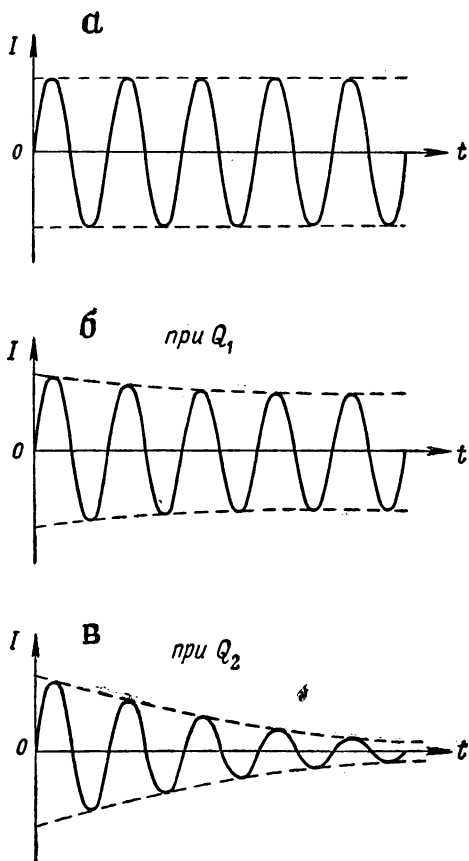


Рис. 235. Графики собственных колебаний при различных значениях качества (добротности) контура:
а — незатухающие колебания; б и в — затухающие колебания ($Q_1 > Q_2$)

нем потери энергии за каждый период колебаний были сведены к минимуму и чтобы частота его собственных затухающих колебаний приближалась к частоте его собственных незатухающих колебаний. Колебательные контуры считаются относительно хорошими, если их качество $Q > 100$, и плохими, если $Q < 20$.

Пример 128. Активное сопротивление колебательного контура $r = 2$ ом, индуктивность $L = 2 \cdot 10^{-4}$ гн, емкость $C = 5 \cdot 10^{-9}$ ф. Определить качество (добротность) контура и затухание его.

Решение. Волновое сопротивление контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-9}}} = 200 \text{ ом.}$$

Затухание контура

$$d = \frac{r}{\rho} = \frac{2}{200} = 0,01.$$

Добротность (качество) контура

$$Q = \frac{1}{d} = \frac{1}{0,01} = 100.$$

В каждом колебательном контуре могут существовать только затухающие собственные колебания, так как на практике нет таких контуров, которые не имели бы активного сопротивления. Если же в контуре происходят незатухающие колебания, то они, как правило, бывают вынужденными, т. е. навязанными какой-либо сторонней электродвижущей силой. В этом случае источник электрической энергии периодически доставляет в контур необходимое количество энергии, чтобы скомпенсировать потери ее на необратимые процессы, например на выделение тепла в активном сопротивлении.

Затухающие колебания в контуре можно сравнить с затухающими колебаниями маятника. Если бы маятник при колебаниях не имел никаких потерь своей заранее запасенной потенциальной энергии (например, на трение в подшипниках, на сопротивление воздуха), то теоретически его колебания должны были бы быть незатухающими и продолжаться сколь угодно долго.

Если же в системе маятника есть потери энергии при его колебаниях, то последние будут затухающими. С каждым новым периодом колебаний амплитуда их будет уменьшаться, и в конце концов колебания маятника прекратятся.

Чем больше потеря энергии в маятнике на необратимые процессы, тем интенсивнее происходит затухание колебаний. Чтобы сделать их незатухающими, необходимо за каждый период колебаний сообщать маятнику такое количество энергии, которое он потерял в течение этого периода. Например, в часах эту энергию маятник получает от раскручивающейся сжатой пружины или от силы тяжести гири, спускающихся вниз.

III. Аперриодический разряд конденсатора

Допустим, что активное сопротивление контура больше двойного волнового сопротивления, т. е. $r > 2\rho$.

Выясним, чему будет равна угловая частота собственных затухающих колебаний в контуре для данного случая.

Согласно формуле (266)

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{r^2}{4\rho^2}}.$$

Но по условию $r > 2\rho$, или $r^2 > 4\rho^2$, или $\frac{r^2}{4\rho^2} > 1$.

В соответствии с этим подкоренное выражение $(1 - \frac{r^2}{4\rho^2})$

в последней формуле — величина отрицательная. Следовательно, в данном случае угловая частота — мнимое число:

$$\omega = j \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r^2}{4\rho^2} - 1},$$

где $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Но если угловая частота собственных затухающих колебаний контура — число мнимое, значит, в данной цепи колебательный разряд невозможен. В ней будет происходить так называемый аперриодический разряд конденсатора.

При аперриодическом разряде конденсатора напряжение на его обкладках монотонно убывает от своей начальной величины до нуля (рис. 236). Разрядный ток в цепи вначале увеличивается от нуля до некоторого максимума, а затем уменьшается, стремясь к нулю (рис. 237).

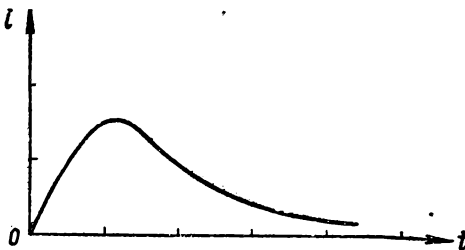


Рис. 237. Изменение тока во времени при аперриодическом разряде конденсатора

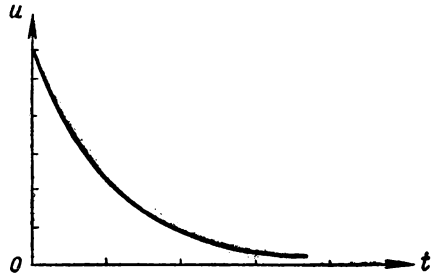


Рис. 236. Изменение напряжения конденсатора при его аперриодическом разряде

Предельное минимальное активное сопротивление контура, в котором при данных индуктивности L и емкости C не будет происходить колебательный разряд конденсатора, равно двойному вол-

новому сопротивлению контура, т. е. $r = 2\rho$. В этом случае угловая частота равна нулю:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{r^2}{4\rho^2}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 - 1} = 0,$$

т. е. колебательный процесс в контуре невозможен.

Итак, если активное сопротивление контура равно двойному волновому сопротивлению контура или больше него, то в данном контуре разряд конденсатора носит аperiодический характер.

Подобно тому как маятник не может совершать собственные колебания в среде с большим сопротивлением его движению, например в вязкой среде, так и в контуре, обладающем большим активным сопротивлением, не может быть осуществлен колебательный разряд конденсатора из-за больших потерь энергии в этом сопротивлении.

§ 110. ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ЦЕПИ С ИНДУКТИВНОСТЬЮ, ЕМКОСТЬЮ И АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ, СОЕДИНЕННЫМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО

Чтобы в цепи, состоящей из индуктивности L , емкости C и активного сопротивления r , происходили незатухающие синусоидальные колебания, необходимо в этой цепи иметь источник электрической энергии с переменным синусоидальным напряжением. Он создаст в цепи переменный синусоидальный ток, длящийся практически сколь угодно долгое время. Частота незатухающих синусоидальных колебаний (тока) будет равна частоте приложенного к цепи синусоидального напряжения. Эта частота для рассматриваемой цепи будет вынужденной (навязанной) и в общем случае не совпадающей с частотой собственных незатухающих колебаний этой цепи (контура).

Рассмотрим основные соотношения электрических величин в цепи с индуктивностью, емкостью и активным сопротивлением, соединенными последовательно, при наличии в ней вынужденных синусоидальных колебаний.

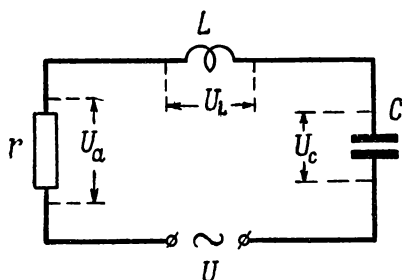


Рис. 238. Схема цепи с последовательно соединенными r , L и C

Допустим, что в цепи (рис. 238), состоящей из последовательно соединенных индуктивности L , емкости C и активного сопротивления r , проходит синусоидальный переменный ток

$$i = I_m \cdot \sin \omega t,$$

создаваемый источником электрической энергии переменного тока.

Выясним, каково должно быть в этом случае напряжение, приложенное к цепи.

Напряжение U , приложенное к данной цепи, расходуется в трех сопротивлениях: активном r , индуктивном $x_L = \omega L$ и емкостном $x_C = \frac{1}{\omega C}$.

Напряжение, расходуемое в активном сопротивлении, совпадает по фазе с током, и его мгновенное значение равно

$$u_a = I_m r \cdot \sin \omega t.$$

Напряжение, расходуемое в индуктивном сопротивлении, опережает по фазе ток на угол $\frac{\pi}{2}$, и его мгновенное значение равно

$$u_L = I_m \omega L \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Напряжение, расходуемое в емкостном сопротивлении, отстает по фазе от тока на угол $\frac{\pi}{2}$, и его мгновенное значение равно

$$u_C = I_m \frac{1}{\omega C} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Мгновенное значение полного напряжения, приложенного ко всей цепи, равняется алгебраической сумме мгновенных значений напряжений, расходуемых на активном, индуктивном и емкостном сопротивлениях:

$$u = u_a + u_L + u_C = I_m r \cdot \sin \omega t + I_m \omega L \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) + I_m \frac{1}{\omega C} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Так как все слагаемые в этом выражении — синусоидальные величины одинаковой частоты, то и сама сумма является синусоидальной величиной той же частоты. А это значит, что к цепи приложено синусоидальное напряжение той же частоты, что и частота синусоидального тока в этой цепи.

Теперь выясним, каково численное соотношение напряжений, имеющих в цепи. Для этой цели построим векторную диаграмму тока и напряжений.

Вектор тока I отложим на векторной диаграмме по начальной оси, так как начальная фаза тока по условию равна нулю. Вектор падения напряжения в активном сопротивлении $U_a = Ir$ отложим по направлению вектора тока I , так как эти величины совпадают по фазе. Вектор падения напряжения в индуктивном

сопротивлению $U_L = I\omega L$ отложим вверх под углом $\frac{\pi}{2}$ к вектору тока I , так как это напряжение опережает ток по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$. Вектор падения напряжения в емкостном сопротивлении отложим вниз под углом $\frac{\pi}{2}$ к вектору тока I , так как это напряжение отстает от вектора тока на угол $\frac{\pi}{2}$. Сложив геометрически векторы U_a , U_L и U_C , получим вектор полного напряжения U , приложенного ко всей цепи:

$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_L + \bar{U}_C.$$

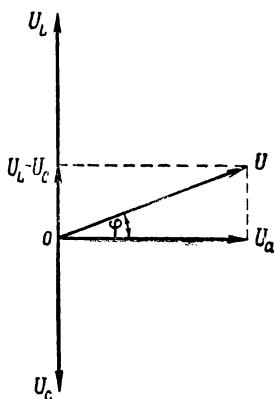


Рис. 239. Векторная диаграмма для случая, когда $U_L > U_C$

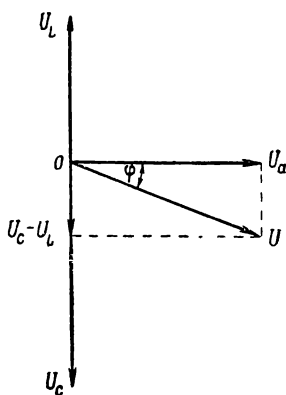


Рис. 240. Векторная диаграмма для случая, когда $U_L < U_C$

На рис. 239 приведена векторная диаграмма для случая, когда $U_L > U_C$, а на рис. 240 — для случая, когда $U_L < U_C$.

Выделим из векторных диаграмм, изображенных на рис. 239 и 240, треугольники напряжений (рис. 241).

Из треугольника напряжений, показанного на рис. 241, а,

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2}, \quad (269)$$

а из треугольника напряжений, показанного на рис. 241, б,

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_C - U_L)^2}. \quad (270)$$

Но так как $(U_L - U_C)^2 = (U_C - U_L)^2$, то формулы (269) и (270) равнозначны. В силу этого независимо от того, будет ли $U_L > U_C$ или, наоборот, $U_L < U_C$, для определения полного напряжения обычно применяют формулу (269).

Разделив стороны треугольников напряжений (рис. 241, *a* и 241, *б*) на величину тока I , получим треугольники сопротивлений (рис. 242).

Из треугольника сопротивлений, показанного на рис. 242, *a*, находим, что полное сопротивление Z равно

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \quad (271)$$

а из треугольника сопротивлений, показанного на рис. 242, *б*, находим, что

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}. \quad (272)$$

Но так как $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 = \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2$, то формулы (271) и (272) равнозначны, а поэтому в дальнейшем для определения полного сопротивления мы будем применять формулу (271).

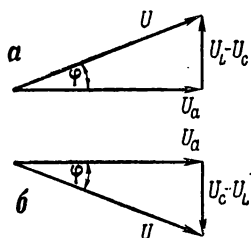


Рис. 241. Треугольники напряжений:

a — для случая, когда $U_L > U_C$; *б* — для случая, когда $U_L < U_C$

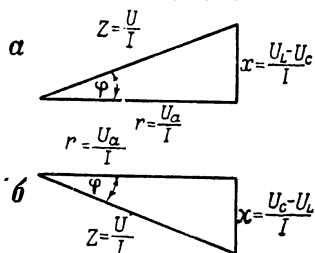


Рис. 242. Треугольники сопротивлений:

a — для случая, когда $U_L > U_C$; *б* — для случая, когда $U_L < U_C$

Разность индуктивного и емкостного сопротивлений цепи называется полным реактивным сопротивлением цепи и обозначается буквой x :

$$x = x_L - x_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}, \quad (273)$$

где x — полное реактивное сопротивление цепи в омах.

Следовательно, формулу для определения полного сопротивления цепи в рассматриваемом случае можно записать так:

$$Z = \sqrt{r^2 + x^2}. \quad (274)$$

Формула закона Ома для рассматриваемой нами цепи принимает следующий вид:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (275)$$

Угол сдвига фаз тока I и напряжения U найдем из треугольника сопротивлений (рис. 242) по тангенсу этого угла

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}. \quad (276)$$

Если $\omega L - \frac{1}{\omega C} > 0$, то угол $\varphi > 0$, что соответствует индуктивному режиму в цепи, т. е. случаю, когда ток отстает по фазе от напряжения на угол φ . Если же $\omega L - \frac{1}{\omega C} < 0$, то $\varphi < 0$, что соответствует емкостному режиму в цепи, т. е. случаю, когда ток опережает по фазе напряжение на угол φ .

Определив угол сдвига фаз тока I и напряжения U , примененного к цепи, можем найти мгновенное значение этого напряжения по формуле

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi). \quad (277)$$

Теперь посмотрим, какова мощность, развиваемая источником электрической энергии в данной цепи.

Мгновенная мощность, развиваемая источником электрической энергии в цепи, равна

$$p = ui = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) I_m \cdot \sin \omega t. \quad (278)$$

Если $\varphi > 0$, т. е. цепь имеет индуктивный характер нагрузки, то выражение (278) принимает следующий вид:

$$p = UI \cdot \cos \varphi - UI \cdot \cos(2\omega t + \varphi). \quad (279)$$

Если же $\varphi < 0$, т. е. в цепи имеет место емкостный характер нагрузки, то выражение (278) принимает следующий вид:

$$p = UI \cdot \cos \varphi - UI \cdot \cos(2\omega t - \varphi). \quad (280)$$

Следовательно, независимо от режима в данной цепи (индуктивного или емкостного) мгновенная мощность в ней — несинусоидальная величина, изменяющаяся с двойной частотой по сравнению с частотой тока.

Активная мощность в данной цепи равна

$$P_a = UI \cdot \cos \varphi, \quad (281)$$

где

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (282)$$

Реактивная мощность

$$P_r = UI \cdot \sin \varphi, \quad (283)$$

где

$$\sin \varphi = \frac{x}{Z} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (284)$$

Эта мощность в рассматриваемой цепи характеризует колебания энергии только между источником и всей цепью и не учитывает местных колебаний энергии между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора. Это видно из того,

что $\sin \varphi = \sin \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{Z}$ и, следовательно, реактивная мощность P_r зависит не от абсолютных величин индуктивного (ωL) и емкостного ($\frac{1}{\omega C}$) сопротивлений, а от их разности ($\omega L - \frac{1}{\omega C}$). Если эта разность велика, то относительно велики величины $\sin \varphi$ и P_r , и, наоборот, если она мала, то относительно мала и реактивная мощность.

Если, например, максимальная энергия, запасаемая в магнитном поле тока катушки, больше максимальной энергии, запасаемой в электрическом поле конденсатора, т. е.

$$\frac{LI_m^2}{2} > \frac{CU_{Cm}^2}{2},$$

то магнитное поле тока катушки, исчезая, передает не всю свою энергию нарастающему электрическому полю конденсатора, а только часть ее, равную максимальной энергии этого поля, т. е.

$\frac{CU_{Cm}^2}{2}$. Остающаяся часть энергии магнитного поля, равная $\frac{LI_m^2}{2} - \frac{CU_{Cm}^2}{2}$, возвращается генератору электрической энергии.

Наоборот, когда магнитное поле нарастает, оно получает необходимую ему энергию $\frac{CU_{Cm}^2}{2}$ от исчезающего электрического

поля конденсатора, а остальную часть энергии $\frac{LI_m^2}{2} - \frac{CU_{Cm}^2}{2}$ получает от генератора. Таким образом, чем меньше разность между максимальными значениями энергии магнитного поля тока катушки и электрического поля конденсатора, тем меньшее количество энергии колеблется между всей цепью и генератором электрической энергии. В частном случае, когда максимальное количество энергии, запасаемой в магнитном поле тока катушки,

численно равно максимальному количеству энергии, запасаемой в электрическом поле конденсатора, эти поля полностью обеспечивают друг друга энергией и не нуждаются в получении ее от генератора.

В заключение следует отметить, что местные колебания энергии в цепи между магнитным полем тока катушки и электрическим полем конденсатора иногда могут значительно превысить по своей мощности колебания энергии между всей цепью в целом и генератором электрической энергии. Это возможно в том случае, когда индуктивное сопротивление катушки ωL и емкостное сопротивление конденсатора $\frac{1}{\omega C}$ будут порознь значительно больше активного сопротивления r цепи и в то же время будут относительно мало различаться между собой по абсолютной величине. В этом случае падения напряжения на индуктивном сопротивлении U_L и на емкостном сопротивлении U_C могут превысить не только падение напряжения в активном сопротивлении, но и напряжение, приложенное ко всей цепи. В самом деле, если $\omega L \gg r$ и $\frac{1}{\omega C} \gg r$, то $I\omega L \gg Ir$ и $I\frac{1}{\omega C} \gg Ir$, или, иначе, $U_L \gg U_a$ и $U_C \gg U_a$. Если же одновременно с этим ωL близко по абсолютной величине к $\frac{1}{\omega C}$, то $\omega L - \frac{1}{\omega C}$ и в соответствии с этим $U_L - U_C$ — малые величины, поэтому

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2} \ll U_L$$

и аналогично

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2} \ll U_C,$$

т. е. напряжения на индуктивности U_L и на емкости U_C в рассматриваемом случае значительно превышают напряжение, приложенное к цепи.

Пример 129. Цепь переменного тока состоит из последовательно соединенных активного сопротивления $r = 20$ ом, катушки, имеющей индуктивность $L = 0,3$ гн, и конденсатора, емкость которого $C = 4$ мкф. Определить режим в этой цепи, если известно, что действующее значение напряжения, приложенного к цепи, $U = 120$ в, а угловая частота

его $\omega = 1000 \frac{1}{\text{сек}}$.

Решение. Индуктивное сопротивление катушки

$$x_L = \omega L = 1000 \cdot 0,3 = 300 \text{ ом.}$$

Емкостное сопротивление конденсатора

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{1000 \cdot 4 \cdot 10^{-6}} = 250 \text{ ом.}$$

Полное реактивное сопротивление цепи

$$X = x_L - x_C = 300 - 250 = 50 \text{ ом.}$$

Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{20^2 + 50^2} = 53,8 \text{ ом.}$$

Действующее значение тока

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{120}{53,8} = 2,23 \text{ а.}$$

Напряжение на активном сопротивлении

$$U_a = Ir = 2,23 \cdot 20 = 44,6 \text{ в.}$$

Напряжение на катушке

$$U_L = Ix_L = 2,23 \cdot 300 = 669 \text{ в.}$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_C = Ix_C = 2,23 \cdot 250 = 557,5 \text{ в.}$$

Угол сдвига фаз тока I и напряжения U находим, определив $\operatorname{tg} \varphi$:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_L - x_C}{r} = \frac{300 - 250}{20} = 2,5,$$

откуда по таблицам тангенсов находим, что

$$\varphi = 68^\circ 10'.$$

Коэффициент мощности равен

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{20}{53,8} = 0,372.$$

Активная мощность

$$P_a = UI \cdot \cos \varphi = 120 \cdot 2,23 \cdot 0,372 = 100 \text{ вт.}$$

Реактивная мощность

$$P_r = UI \cdot \sin \varphi = 120 \cdot 2,23 \cdot \frac{50}{53,8} = 250 \text{ вар.}$$

Полная мощность

$$P_l = UI = 120 \cdot 2,23 = 270 \text{ ва.}$$

Максимальная энергия, запасаемая в магнитном поле катушки, равна

$$W_m = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{0,3 (\sqrt{2} \cdot 2,23)^2}{2} = 1,5 \text{ дж.}$$

Максимальная энергия, запасаемая в электрическом поле конденсатора,

$$W_{em} = \frac{CU_C^2}{2} = \frac{4 \cdot 10^{-6} (\sqrt{2} \cdot 557,5)^2}{2} = 1,25 \text{ дж.}$$

Количество энергии, которой взаимно обмениваются магнитное поле тока катушки и электрическое поле конденсатора,

$$W' = W_{em} = 1,25 \text{ дж.}$$

Количество энергии, которая колеблется между генератором электрической энергии и всей цепью,

$$W'' = W_{m m} - W_{o m} = 1,5 - 1,25 = 0,25 \text{ дж.}$$

Количество энергии, расходуемой в активном сопротивлении за четверть периода,

$$W_{\text{тепл}} = P_a \frac{T}{4} = P_a \frac{2\pi}{\omega \cdot 4} = 100 \cdot \frac{2 \cdot 3,14}{1000 \cdot 4} = 0,157 \text{ дж.}$$

§ 111. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

Если к цепи, состоящей из последовательно соединенных активного сопротивления r , индуктивности L и емкости C (см. рис. 238), приложить синусоидальное напряжение $u = U_m \cdot \sin \omega t$, то в ней возникнут вынужденные электромагнитные колебания, частота которых будет совпадать с частотой приложенного к цепи напряжения. Переменный ток, возникший в этой цепи, будет также изменяться по закону синуса с частотой, равной частоте приложенного напряжения, т. е. он будет равен $i = I_m \cdot \sin (\omega t - \varphi)$.

Если в данной цепи индуктивное сопротивление больше емкостного, то угол φ сдвига фаз тока и напряжения — положительная величина и в соответствии с этим режим в цепи носит индуктивный характер. Наоборот, если индуктивное сопротивление меньше емкостного, то угол сдвига фаз тока и напряжения — отрицательная величина и режим в цепи носит емкостный характер.

Величину угла φ сдвига фаз тока и напряжения можно определить по тангенсу этого угла

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}.$$

Изменяя величину L , или C , или угловой частоты ω , можно добиться того, что тангенс угла φ станет равным нулю:

$$\operatorname{tg} \varphi = 0.$$

А если это так, то необходимо, чтобы угол φ тоже был равен нулю, так как $\operatorname{tg} 0 = 0$.

Если же угол φ равен нулю, то это значит, что в данной цепи, состоящей из последовательно соединенных активного сопротивления, индуктивности и емкости, ток и напряжение совпадают по фазе.

Явление совпадения по фазе тока и напряжения в цепи с индуктивностью и емкостью называется электрическим резонансом.

Различают две разновидности электрического резонанса в цепях — резонанс напряжений и резонанс токов.

Резонанс напряжений возникает в цепи с последовательно соединенными индуктивностью и емкостью, а резонанс токов — в цепи с параллельным соединением их.

В настоящем параграфе мы рассмотрим явление резонанса напряжений, а в последующем, когда ознакомимся с режимами в параллельных цепях переменного тока, рассмотрим также и явление резонанса токов.

Выясним, при каких условиях возникает резонанс напряжений, чем характерно это явление, каковы соотношения электрических величин при нем и некоторые другие положения, имеющие практический интерес.

Итак, **резонансом напряжений в цепи переменного тока, состоящей из последовательно соединенных индуктивности L , емкости C и активного сопротивления r , называется режим, при котором ток и напряжение совпадают по фазе.**

При резонансе напряжений ток и напряжение изменяются синфазно, т. е. они имеют одинаковую частоту колебаний, изменяются по одному и тому же синусоидальному закону и одновременно достигают своих нулевых и максимальных значений одинакового знака. Благодаря этому в цепи создается максимальный размах электрических колебаний, т. е. максимальное значение тока при заданном напряжении, практически максимальные величины энергии электрического поля конденсатора и магнитного поля катушки, а также максимальные напряжения на индуктивности и емкости.

Вначале установим, при каких условиях может возникнуть резонанс напряжений в цепи.

Если в цепи с последовательно соединенными индуктивностью L , емкостью C и активным сопротивлением r возникает резонанс напряжений, то угол φ сдвига фаз тока и напряжения, а следовательно, и тангенс этого угла должны быть равны нулю, т. е.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C}}{r} = 0.$$

Последнее равенство может быть справедливым только в том случае, когда

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0,$$

или, иначе,

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad (285)$$

т. е. явление резонанса напряжений в цепи возникает тогда, когда в ней равны индуктивное $\omega_0 L$ и емкостное $\frac{1}{\omega_0 C}$ сопротивления.

Иначе можно сказать, что резонанс напряжений в цепи возникает тогда, когда полное реактивное сопротивление цепи становится равным нулю:

$$X = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0.$$

Теперь, исходя из формулы (285), определим угловую частоту тока (напряжения) в цепи при наличии в ней резонанса напряжений:

$$\omega_0^2 LC = 1, \text{ или } \omega_0^2 = \frac{1}{LC},$$

или

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (286)$$

где ω_0 — резонансная угловая частота;

L — индуктивность в генри;

C — емкость в фарадах.

Исходя из формулы (286), определим резонансную частоту колебаний в цепи (в контуре):

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}, \quad (287)$$

где f_0 — резонансная частота в герцах.

Нетрудно видеть, что формула (286) для определения резонансной угловой частоты в точности совпадает с формулой (260) для определения угловой частоты собственных незатухающих колебаний в цепи. Следовательно, можно сказать, что **резонанс напряжений** — это такое явление в цепях переменного тока, при котором наблюдается совпадение частоты вынужденных колебаний с частотой собственных незатухающих колебаний цепи.

Пример 130. Определить резонансную угловую частоту ω_0 и частоту f_0 цепи, индуктивность которой $L = 4 \cdot 10^{-4}$ гн, а емкость $C = 1,6 \cdot 10^{-9}$ ф.

Решение. По формуле (286) находим резонансную угловую частоту

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,6 \cdot 10^{-9}}} = 1,25 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Резонансная частота равна

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1250000}{2 \cdot 3,14} \cong 200000 \text{ гц.}$$

Полное реактивное сопротивление цепи при резонансе напряжений равно нулю, т. е.

$$X = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0.$$

Это объясняется тем, что электродвижущая сила самоиндукции катушки E_L и электродвижущая сила конденсатора E_C численно равны, но сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол 180° (находятся в противофазе), а потому взаимно компенсируются. Следовательно, индуктивное и ёмкостное сопротивления, будучи численно равными, но разными по знакам, также взаимно компенсируются.

Равенство нулю полного реактивного сопротивления цепи при резонансе напряжений приводит к тому, что полное сопротивление всей цепи равно ее активному сопротивлению. Следовательно, цепь в целом по отношению к генератору ведет себя как цепь с чисто активным сопротивлением

$$Z = \sqrt{r^2 + X^2} = \sqrt{r^2 + 0} = r. \quad (288)$$

В соответствии с этим действующее значение тока в резонансной цепи при заданном напряжении U становится максимальным:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{r}. \quad (289)$$

Это полностью соответствует тому, что при резонансе напряжений получают наиболее мощные электрические колебания в цепи вследствие совпадения по фазе тока и напряжения, а также совпадения вынужденной частоты колебаний и частоты собственных незатухающих колебаний.

Мгновенное значение тока при заданном напряжении $u = U_m \cdot \sin \omega t$ будет определяться выражением

$$i = \frac{U_m}{r} \cdot \sin \omega t = I_m \cdot \sin \omega t,$$

поскольку ток и напряжение по условию совпадают по фазе.

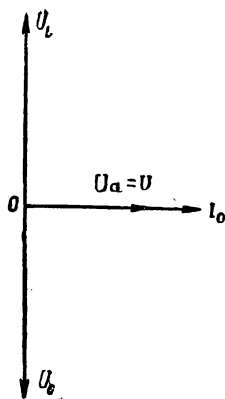
Падение напряжения на активном сопротивлении r согласно формуле (289) равно

$$U_{a0} = I_0 r = U, \quad (290)$$

т. е. падение напряжения на активном сопротивлении резонансной цепи U_a равно напряжению, приложенному к цепи.

Падение напряжения на индуктивном сопротивлении резонансной цепи равно

$$U_{L0} = I_0 \omega_0 L$$



и падение напряжения на емкостном сопротивлении равно

$$U_{C_0} = I_0 \frac{1}{\omega_0 C}.$$

А так как по условию при резонансе напряжений индуктивное сопротивление равно емкостному, то и падение напряжения на индуктивном сопротивлении в этом случае равно падению напряжения на емкостном сопротивлении, т. е.

$$U_{L_0} = U_{C_0}. \quad (291)$$

Рис. 243. Векторная диаграмма тока и напряжений для случая резонанса напряжений

На рис. 243 приведена векторная диаграмма тока и напряжений для случая резонанса напряжений. Здесь показано, что активная составляющая напряжения U_a совпадает по фазе с током I_0 , напряжение U_L опережает по фазе ток на угол $\frac{\pi}{2}$, напряжение U_C отстает по фазе от тока

на угол $\frac{\pi}{2}$ и, наконец, полное напряжение U , равное по величине U_a , совпадает по фазе с током.

Напряжения U_{L_0} и U_{C_0} численно равны друг другу и находятся в противофазе, а поэтому их геометрическая сумма равна нулю. Это и приводит к тому, что все напряжение U , приложенное к цепи, расходуется при резонансе напряжений на преодоление активного сопротивления, т. е. $U = U_a$.

Если при резонансе напряжений окажется, что индуктивное сопротивление $\omega_0 L$ цепи и равное ему емкостное сопротивление $\frac{1}{\omega_0 C}$ окажутся порознь значительно больше активного сопротивления цепи r , то и падения напряжения в них U_{L_0} и U_{C_0} порознь будут значительно больше активной составляющей напряжения U_a и, следовательно, значительно больше приложенного к цепи напряжения U . Это видно из следующих математических соотношений: если

$$r \ll \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C},$$

то

$$I_0 r \ll I_0 \omega_0 L = I_0 \frac{1}{\omega_0 C};$$

но так как

$$I_0 r = U_a = U; \quad I_0 \omega_0 L = U_{L_0}; \quad I_0 \frac{1}{\omega_0 C} = U_{C_0},$$

$$U \ll U_{L0} = U_{C0}$$

Перенапряжения, возникающие на катушке и на конденсаторе при резонансе напряжений, обусловлены тем, что внутри цепи создаются относительно мощные местные колебания энергии между магнитным полем тока катушки и электрическим полем конденсатора.

Теперь посмотрим, каков энергетический баланс в цепи (контуре) при резонансе напряжений.

Если напряжение, приложенное к резонансному контуру, изменяется по закону

$$u = U_m \cdot \sin \omega t,$$

то мгновенное значение тока в контуре при резонансе напряжений определяется по формуле

$$i = I_m \cdot \sin \omega t,$$

так как ток и напряжение совпадают по фазе.

Мгновенные значения напряжений на индуктивности и емкости в данном случае выражаются формулами

$$u_L = U_{Lm} \cdot \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

$$u_C = U_{Cm} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

В соответствии с этим максимальное количество энергии, запасаемой в магнитном поле катушки за четверть периода, равно

$$W_{*m} = \frac{LI_m^2}{2}, \quad (292)$$

где W_{*m} — максимальная энергия, запасаемая в магнитном поле катушки, в джоулях;

I_m — амплитуда тока в амперах;

L — индуктивность катушки в генри.

Максимальное количество энергии, запасаемой в электрическом поле конденсатора, равно

$$W_{*m} = \frac{CU_{Cm}^2}{2}, \quad (293)$$

где W_{*m} — максимальная энергия, запасаемая в электрическом поле конденсатора, в джоулях;

U_{Cm} — амплитуда напряжения на конденсаторе, в вольтах;

C — емкость конденсатора в фарадах.

Нетрудно показать, что максимальное количество энергии, запасаемой в катушке при резонансе напряжений, равно максимальному количеству энергии, запасаемой в электрическом поле конденсатора.

Так как

$$U_{Cm} = I_m \frac{1}{\omega_0 C} \text{ и } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

то

$$\frac{CU_{Cm}^2}{2} = \frac{C \left(I_m \frac{1}{\omega_0 C} \right)^2}{2} = \frac{CI_m^2}{2\omega_0^2 C^2} = \frac{LI_m^2}{2 \frac{1}{LC} C} = \frac{LI_m^2}{2},$$

или

$$\frac{CU_{Cm}^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2},$$

т. е.

$$W_{\circ m} = W_{m m}. \quad (294)$$

Нетрудно также показать, что в любой момент времени при резонансе напряжений общее количество энергии, сосредоточенной в электрическом и магнитном полях резонансного контура, постоянно и равно максимальному количеству энергии, запасаемой магнитным полем катушки или электрическим полем конденсатора.

Мгновенное значение энергии магнитного поля катушки равно

$$W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{LI_m^2 \cdot \sin^2 \omega t}{2}.$$

Мгновенное значение энергии электрического поля конденсатора равно

$$W_{\circ} = \frac{CU_C^2}{2} = \frac{CU_{Cm}^2 \cdot \sin^2 \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)}{2} = \frac{CU_{Cm}^2}{2} \cdot \cos^2 \omega t.$$

Сумма мгновенных значений энергии магнитного и электрического полей в резонансном контуре при резонансе напряжений равна

$$W_m + W_{\circ} = \frac{LI_m^2}{2} \cdot \sin^2 \omega t + \frac{CU_{Cm}^2}{2} \cdot \cos^2 \omega t.$$

Но так как

$$\frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_{Cm}^2}{2},$$

то

$$W_M + W_C = \frac{LI_m^2}{2} (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_{Cm}^2}{2}. \quad (295)$$

На рис. 244 приведены графики изменения энергии магнитного, электрического полей и суммы этих энергий в зависимости от времени при резонансе напряжений.

При резонансе напряжений цепь по отношению к генератору является чисто активной и генератор посылает в цепь энергию, необходимую только для покрытия активных потерь. Что же касается энергии, потребной для сохранения магнитного поля в катушке, и энергии, потребной для создания электрического поля конденсатора, то генератор разгружен от них, так как катушка и конденсатор взаимно обмениваются энергией. Энергия исчезающего магнитного поля катушки переходит в энергию нарастающего электрического поля конденсатора, и, наоборот, энергия исчезающего электрического поля конденсатора переходит в энергию нарастающего магнитного поля катушки.

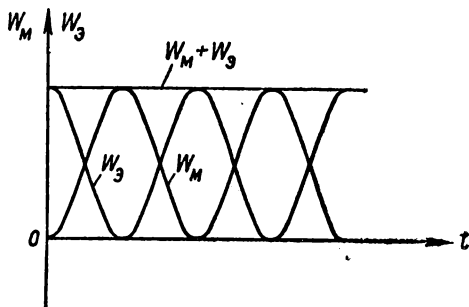


Рис. 244. Графики изменения электрической W_C и магнитной W_M энергии во времени

Чем меньше активное сопротивление цепи, тем при прочих равных условиях мощнее электромагнитные колебания в цепи при резонансе напряжений, тем большим количеством энергии обмениваются электрическое и магнитное поля цепи и тем соответственно больше напряжения на катушке индуктивности и на конденсаторе и больше величина тока в цепи.

Индуктивное и емкостное сопротивления при резонансе напряжений порознь равны волновому сопротивлению цепи:

$$x_{L0} = \omega_0 L = \frac{1}{\sqrt{LC}} L = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho, \quad (296)$$

$$x_{C0} = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{LC}} C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho, \quad (297)$$

где ρ — волновое сопротивление цепи.

Затухание цепи (контура), как известно, равно отношению активного сопротивления r цепи к ее волновому сопротивлению ρ :

$$d = \frac{r}{\rho}, \quad (298)$$

где d — затухание цепи.

Помножив числитель и знаменатель последней формулы на величину резонансного тока I_0 , получим

$$d = \frac{I_0 r}{I_0 \rho} = \frac{U_{a_0}}{U_{L_0}} = \frac{U}{U_{L_0}} = \frac{U}{U_{C_0}}, \quad * \quad (299)$$

т. е. затухание цепи численно равно отношению величины напряжения, приложенного к цепи при резонансе напряжений, к величине падения напряжения на индуктивном или на емкостном сопротивлении ее.

Добротность (качество) — это величина, обратная затуханию цепи, т. е.

$$Q = \frac{1}{d} = \frac{U_{L_0}}{U} = \frac{U_{C_0}}{U}, \quad (300)$$

где Q — добротность (качество) цепи (контура).

Следовательно, добротность Q цепи — это величина, показывающая, во сколько раз напряжение на индуктивности и емкости в отдельности больше напряжения, приложенного ко всей цепи.

В радиотехнических контурах стремятся добиться того, чтобы добротность контура была относительно большой, так как в этом случае при резонансе напряжений напряжение на конденсаторе (на катушке) во много раз превысит напряжение, приложенное к контуру, что с успехом используется для усиления электромагнитных колебаний в радиотехнических цепях.

Пример 131. К колебательному контуру, состоящему из индуктивности $L = 1,6 \cdot 10^{-3}$ гн, емкости $C = 25 \cdot 10^{-12}$ ф и активного сопротивления $r = 20$ ом, приложено синусоидальное напряжение, действующее значение которого $U = 1,2$ в.

Определить режим в этом контуре, если в нем возник резонанс напряжений.

Решение. Резонансная угловая частота

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 25 \cdot 10^{-12}}} = 5 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Волновое сопротивление контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-3}}{25 \cdot 10^{-12}}} = 8000 \text{ ом}.$$

Затухание контура

$$d = \frac{r}{\rho} = \frac{20}{8000} = 0,0025.$$

Добротность контура

$$Q = \frac{1}{d} = \frac{1}{0,0025} = 400.$$

Напряжение на индуктивности и емкости контура

$$U_{L_0} = U_{C_0} = QU = 400 \cdot 1,2 = 480 \text{ в.}$$

Индуктивное сопротивление контура

$$\omega_0 L = 5 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} = 8000 \text{ ом.}$$

Емкостное сопротивление контура

$$\frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{5 \cdot 10^6 \cdot 25 \cdot 10^{-12}} = 8000 \text{ ом.}$$

Полное реактивное сопротивление контура

$$x = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 8000 - 8000 = 0.$$

Сдвиг фаз тока и напряжения

$$\varphi = 0, \text{ так как } \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r} = \frac{0}{20} = 0.$$

Величина тока в контуре

$$I_0 = \frac{U}{r} = \frac{1,2}{20} = 0,06 \text{ а.}$$

Активная мощность, развиваемая током в контуре,

$$P_a = I_0^2 r = 0,06^2 \cdot 20 = 0,072 \text{ вт.}$$

Максимальная энергия, запасаемая в магнитном поле катушки,

$$W_{m \text{ м}} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{1,6 \cdot 10^{-3} (V\sqrt{2} \cdot 0,06)^2}{2} = 5,76 \cdot 10^{-6} \text{ дж.}$$

Максимальная энергия, запасаемая электрическим полем конденсатора,

$$W_{э \text{ м}} = \frac{CU_{Cm}^2}{2} = \frac{25 \cdot 10^{-12} (V\sqrt{2} \cdot 480)^2}{2} = 5,76 \cdot 10^{-6} \text{ дж.}$$

Реактивная мощность в контуре

$$P_r = I_0^2 x_L = 0,06^2 \cdot 8000 = 28,8 \text{ ва,}$$

т. е. она численно превышает активную мощность, развиваемую источником электрической энергии в контуре, примерно в 390 раз.

При исследовании резонансных явлений и определении добротности колебательных контуров важную роль играют резонансные кривые, выражающие зависимость действующего значения тока или напряжения на индуктивности (емкости) цепи от частоты приложенного к цепи напряжения, индуктивности или емкости.

Рассмотрим резонансную кривую тока, выражающую зависимость действующего значения тока от частоты.

Допустим, что задана цепь, состоящая из последовательно соединенных активного сопротивления r , индуктивности L и емкости C . К этой цепи подключен источник электрической энергии с переменным синусоидальным напряжением, частоту которого мы можем плавно изменять от нуля до максимальной величины — теоретически до бесконечно большой величины.

Как известно, действующее значение тока в заданной цепи можно определить по формуле

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (301)$$

Не изменяя действующего значения напряжения U , активного сопротивления r , индуктивности L и емкости C , будем плавно изменять частоту ω (угловую частоту) генератора от нуля до бесконечности и проследим, как будет в соответствии с этим изменяться величина тока I , определяемая формулой (301).

Допустим, что частота f , а следовательно, и угловая частота ω равны нулю.

Тогда при $\omega = 0$

$$x_L = \omega L = 0 \cdot L = 0; \quad x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{0 \cdot C} = \infty;$$

$$x_L - x_C = 0 - \infty = -\infty; \quad z = \sqrt{r^2 + (-\infty)^2} = \infty$$

и в соответствии с этим ток равен нулю:

$$I = \frac{U}{\infty} = 0.$$

Далее полагаем, что частота f , а следовательно, и угловая частота ω равны бесконечно большим величинам.

Тогда при $\omega = \infty$

$$\omega L = \infty \cdot L = \infty; \quad \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\infty \cdot C} = 0;$$

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = \infty - 0 = \infty; \quad z = \sqrt{r^2 + (\infty)^2} = \infty$$

и в соответствии с этим ток равен нулю:

$$I = \frac{U}{\infty} = 0.$$

Итак, действующий ток в заданной цепи как при $\omega = 0$, так и при $\omega = \infty$ равен нулю. А это значит, что ток I при изменении частоты ω от 0 до ∞ должен возрастать, достигая своего максимума при каком-то значении ω , а затем убывать до 0.

Из формулы (301) видно, что действующее значение тока I в заданной цепи достигает максимума тогда, когда знаменатель

имеет минимальное значение. Нетрудно видеть, что максимума ток достигнет тогда, когда $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$, или, иначе, когда

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

А это означает, что максимума ток I достигнет в данной цепи при резонансе напряжений. Это и понятно, так как именно при резонансе напряжений электромагнитные колебания в цепи достигают наибольшего размаха.

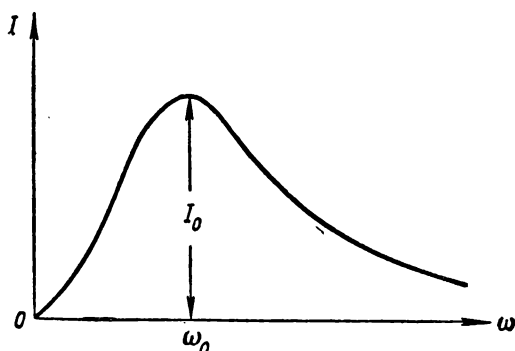


Рис. 245. Резонансная кривая тока

Следовательно, ток I становится максимальным при угловой частоте ω , равной резонансной угловой частоте ω_0 :

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Величина этого максимума тока I равна

$$I = I_0 = \frac{U}{r}.$$

На рис. 245 приведена резонансная кривая тока, выражающая зависимость тока I от частоты ω .

На форму кривой резонанса влияет затухание цепи d . Чем оно меньше, т. е. чем меньше активное сопротивление цепи по сравнению с ее волновым сопротивлением ρ , тем кривая резонанса будет острее и выше при всех прочих равных условиях, и, наоборот, она будет более полой и ниже при относительно большом затухании цепи.

На рис. 246 приведены две резонансные кривые тока для одной и той же цепи, но имеющей различные активные сопротивления, или, иначе, различные затухания, причем во всех случаях к ней было приложено одно и то же синусоидальное напряжение.

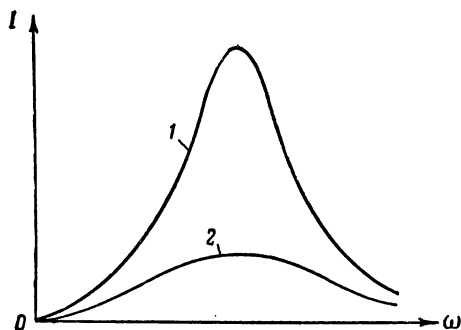


Рис. 245. Резонансные кривые тока:
1 — при малом затухании; 2 — при большом затухании

При остром резонансе, когда резонансная кривая имеет резко выраженную пикообразную форму, контур слабо отзывается на частоты, отличающиеся от его собственной частоты, но зато при резонансе напряжений в нем возникают колебания с относительно большой амплитудой. Наоборот, при большом затухании контура амплитуда колебаний при резонансе напряжений относительно мала и контур легко воспринимает колебания не

только резонансной частоты, но и широкую полосу соседних с ней частот. Резонансная кривая в этом случае получается тупой.

В радиотехнических цепях колебательные контуры подбираются обычно так; чтобы они хорошо пропускали определенную полосу частот. Например, при радиовещании для высококачественного приема звуковой передачи полоса частот радиоприемника должна составлять 9000 гц.

Полосу частот, хорошо пропускаемую колебательным контуром, называют **полосой пропускания контура** или шириной кривой резонанса.

Полосу пропускания контура определяют по резонансной кривой, принимая за границы боковые частоты, при которых ток составляет 70% резонансного (рис. 247).

Зависимость полосы пропускания колебательного контура от затухания определяется по формуле

$$f_{\text{пр}} = d f_0, \quad (302)$$

где $f_{\text{пр}}$ — полоса пропускания контура в герцах;

d — затухание контура;

f_0 — резонансная частота в герцах.

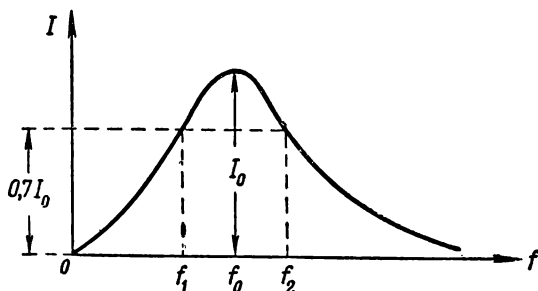


Рис. 247. Полоса пропускания контура

Пример 132. Колебательный контур настроен в резонанс на частоту $f_0 = 10^6$ гц. Определить полосу пропускания контура, если затухание его $d = 0,01$.

Решение. Применяя формулу (302), находим, что полоса пропускания контура

$$f_{\text{пр}} = df_0 = 0,01 \cdot 10^6 = 10000 \text{ гц.}$$

Из формулы (302) следует, что для узкой полосы пропускания контура необходимо иметь малое затухание контура, или, иначе, высокое его качество (добротность).

Иногда приходится вести радиотехнические передачи при очень широкой полосе частот (например, при телевизионной передаче полоса пропускания измеряется несколькими миллионами герц). В этих случаях контур должен работать на весьма высокой резонансной частоте.

Пример 133. Колебательный контур настроен в резонанс на частоту $f_0 = 5 \cdot 10^7$ гц. Определить полосу пропускания контура, если затухание контура $d = 0,1$.

Решение. Применяя формулу (302), находим

$$f_{\text{пр}} = df_0 = 0,1 \cdot 5 \cdot 10^7 = 5 \cdot 10^6 \text{ гц.}$$

Явление резонанса напряжений широко применяется в радиотехнике. Как известно, переносные радиостанции малой мощности обычно работают в широком диапазоне радиочастот. Поэтому радиостанцию надо настраивать на ту или иную рабочую волну. Чтобы добиться наиболее мощного излучения радиостанции, ее антенный контур необходимо настроить в резонанс колебаниям, создаваемым генератором.

На рис. 248 показан антенный контур радиостанции, индуктивно связанный с катушкой L_r генератора через катушку связи L_c . Помимо этой катушки, антенный контур имеет катушку индуктивности L_k для грубой настройки и конденсатор C переменной емкости для точной настройки на заданную волну.

Путем подбора числа секций катушки L_k и емкости конденсатора C добиваются возникновения в антенном контуре резонанса напряжений, который возникнет в нем только в том случае, если частота вынужденных колебаний генератора будет равна резонансной частоте антенного контура. Тогда ток в антенном контуре достигнет максимального значения, о чем можно судить по яркому накалу индикаторной лампочки L . Напряжения на катушке и конденсаторе станут максимальными. Все это способствует наиболее эффективному радиозлучению антенны.

Убедившись, что антенный контур настроен в резонанс, выключают индикаторную лампочку выключателем B .

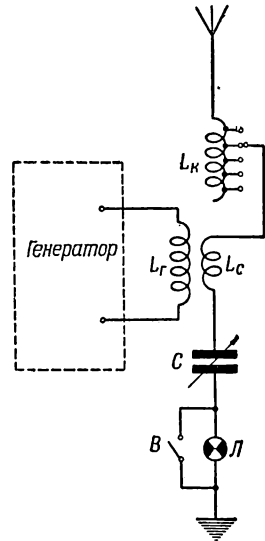


Рис. 248. Схема антенного контура

ГЛАВА XXIII

ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ ПОТРЕБИТЕЛЯМИ

§ 112. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ДВУМЯ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ КАТУШКАМИ ИНДУКТИВНОСТИ

Рассмотрим цепь переменного тока, состоящую из двух параллельно соединенных катушек индуктивности (рис. 249). Одна из этих катушек имеет активное сопротивление r_1 и индуктивность L_1 , а другая — активное сопротивление r_2 и индуктивность L_2 . Напряжение, приложенное к цепи, синусоидально, и его действующее значение равно U . Определим ток в неразветвленном участке цепи I_0 , если известны токи в параллельных ветвях I_1 и I_2 .

Так как в общем случае токи I_1 и I_2 в параллельно соединенных катушках не совпадают по фазе, то результирующий ток I_0 равен геометрической сумме этих токов:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 + \bar{I}_2. \quad (303)$$

В участке цепи с первой катушкой:

1) полное сопротивление катушки

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2};$$

2) ток в ней

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}};$$

3) сдвиг фаз (φ_1) тока и напряжения определяем по тангенсу:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\omega L_1}{r_1}.$$

В участке цепи со второй катушкой:

1) полное сопротивление катушки

$$Z_2 = \sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2};$$

2) ток в ней

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2}};$$

3) сдвиг фаз (φ_2) тока и напряжения определяем по тангенсу:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{\omega L_2}{r_2}.$$

Зная величины токов I_1 и I_2 , углы φ_1 и φ_2 сдвига их фаз по отношению к напряжению, построим векторную диаграмму токов и напряжений.

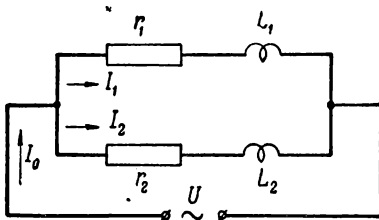


Рис. 249. Схема цепи переменного тока, состоящей из двух параллельно соединенных катушек индуктивности

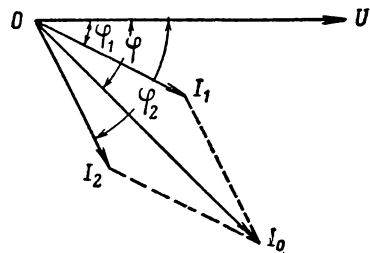


Рис. 250. Векторная диаграмма напряжения и токов при параллельном соединении катушек индуктивности

Отложим по горизонтальной оси вектор напряжения U , а затем под углами φ_1 и φ_2 к нему — векторы токов I_1 и I_2 (рис. 250).

Так как токи в катушках отстают по фазе от приложенного напряжения U , то векторы I_1 и I_2 должны быть повернуты на углы φ_1 и φ_2 по часовой стрелке от начальной оси.

Чтобы получить результирующий ток I_0 , сложим векторы I_1 и I_2 геометрически по правилу параллелограмма. Из полученного параллелограмма определим результирующий ток I_0 , являющийся одной из его диагоналей, применяя известную формулу тригонометрии

$$I_0^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$$

или

$$I_0 = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (304)$$

В частном случае, если $\varphi_1 = \varphi_2$, т. е. в катушках имеется одинаковый сдвиг фаз, то

$$\varphi_2 - \varphi_1 = 0 \text{ и } \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1,$$

и тогда

$$I_0 = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2} = \sqrt{(I_1 + I_2)^2} = I_1 + I_2,$$

т. е. результирующий ток I_0 равен арифметической сумме токов составляющих.

Из векторной диаграммы нетрудно понять, что

$$I_0 \cdot \cos \varphi = I_1 \cdot \cos \varphi_1 + I_2 \cdot \cos \varphi_2,$$

откуда

$$\cos \varphi = \frac{I_1 \cdot \cos \varphi_1 + I_2 \cdot \cos \varphi_2}{I_0}, \quad (305)$$

где φ — угол сдвига между током I_0 и напряжением U .

Если цепь состоит из совокупности несколько параллельно

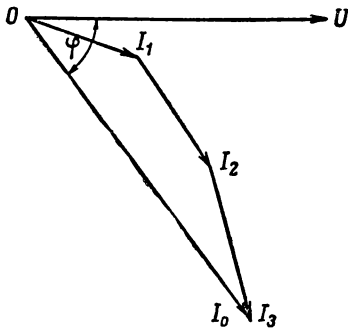


Рис. 251. Векторная диаграмма напряжения и токов для случая параллельного соединения нескольких катушек

соединенных катушек индуктивности, то результирующий ток будет равен геометрической сумме векторов составляющих токов (рис. 251). В этом случае можно ограничиться геометрическим способом решения: задавшись масштабом для тока, сложить все векторы токов по правилу многоугольника (результрующий ток равен замыкающей стороне многоугольника, построенного на векторах составляющих токов) и полученный результирующий вектор тока определить по масштабной линейке. Угол сдвига фаз определяется по транспортиру.

Так как напряжение, приложенное ко всем катушкам, одинаково, то.

$$U = I_1 Z_1 = I_2 Z_2 = \dots = I_n Z_n,$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_2}{Z_1}; \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{Z_3}{Z_2} \text{ и т. д.}, \quad (306)$$

т. е. токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально полным сопротивлениям ветвей.

Пример 134. Даны две катушки, соединенные параллельно и подключенные к источнику с напряжением $U = 120$ в. Угловая частота $\omega = 1000 \frac{1}{\text{сек}}$.

Одна из катушек имеет активное сопротивление $r_1 = 30$ ом и индуктивность $L_1 = 0,04$ гн, другая — активное сопротивление $r_2 = 80$ ом и индуктивность

$L_2 = 0,06$ мн. Требуется определить токи в параллельных ветвях, ток в неразветвленном участке цепи, сдвиг фаз между токами и напряжением и мощность, расходуемую в цепи.

Решение. Величина тока в первой катушке

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} = \frac{120}{\sqrt{30^2 + (1000 \cdot 0,04)^2}} = 2,4 \text{ а.}$$

Сдвиг фаз φ_1 определим по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\omega L_1}{r_1} = \frac{1000 \cdot 0,04}{30} = 1,333,$$

откуда по таблицам тангенсов найдем

$$\varphi_1 = 53^\circ 10'.$$

Величина тока во второй катушке

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2}} = \frac{120}{\sqrt{80^2 + (1000 \cdot 0,06)^2}} = 1,2 \text{ а.}$$

Сдвиг фаз φ_2 определим по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{1000 \cdot 0,06}{80} = 0,75,$$

откуда по таблице тангенсов найдем

$$\varphi_2 = 36^\circ 50'.$$

Ток в неразветвленном участке цепи определяем по формуле (304)

$$\begin{aligned} I_0 &= \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1I_2 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} = \\ &= \sqrt{2,4^2 + 1,2^2 + 2 \cdot 2,4 \cdot 1,2 \cdot \cos(53^\circ 10' - 36^\circ 50')} = \\ &= \sqrt{5,76 + 1,44 + 2 \cdot 2,4 \cdot 1,2 \cdot 0,96} \approx 3,56 \text{ а.} \end{aligned}$$

Коэффициент мощности для всей цепи

$$\cos \varphi = \frac{I_1 \cdot \cos \varphi_1 + I_2 \cdot \cos \varphi_2}{I_0} = \frac{2,4 \cdot 0,6 + 1,2 \cdot 0,8}{3,6} = 0,65.$$

Сдвиг фаз между током I_0 и напряжением U можем найти по таблице косинусов. Для $\cos \varphi = 0,65$

$$\varphi = 49^\circ 20'.$$

Мощность, расходуемая в первой катушке,

$$P_1 = I_1^2 r_1 = 2,4^2 \cdot 30 = 172,8 \text{ вт.}$$

Мощность, расходуемая во второй катушке,

$$P_2 = I_2^2 r_2 = 1,2^2 \cdot 80 = 115,2 \text{ вт.}$$

Мощность, расходуемая во всей цепи,

$$P = P_1 + P_2 = 172,8 + 115,2 = 288 \text{ вт.}$$

§ 113. АКТИВНЫЙ И РЕАКТИВНЫЙ ТОК

Задана цепь, состоящая из активного сопротивления r и индуктивности L , соединенных последовательно друг с другом. Если к данной цепи приложено синусоидальное напряжение

$$u = U_m \cdot \sin \omega t,$$

то мгновенное значение тока будет равно

$$i = I_m \cdot \sin (\omega t - \varphi).$$

Действующее значение тока

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}.$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}.$$

Активная мощность

$$P_a = UI \cdot \cos \varphi,$$

реактивная мощность

$$P_r = UI \cdot \sin \varphi$$

и полная мощность

$$P_l = UI.$$

На рис. 252 приведена векторная диаграмма тока и напряжения для данного случая, где ток I показан отстающим по фазе от напряжения на угол φ .

Запишем формулы активной и реактивной мощностей следующим образом:

$$P_a = U (I \cdot \cos \varphi);$$

$$P_r = U (I \cdot \sin \varphi),$$

т. е. отнесем множители $\cos \varphi$ и $\sin \varphi$ непосредственно к величине тока I .

Величина $I \cdot \cos \varphi$ называется активной составляющей тока (I_a):

$$I_a = I \cdot \cos \varphi, \quad (307)$$

и формулу для определения активной мощности можно записать так:

$$P_a = UI_a. \quad (308)$$

Величина $I \cdot \sin \varphi$ называется реактивной составляющей тока (I_r):

$$I_r = I \cdot \sin \varphi, \quad (309)$$

и в соответствии с этим формулу для определения реактивной мощности можно записать так:

$$P_r = UI_r. \quad (310)$$

Если в векторной диаграмме (рис. 252) разложить вектор тока I на две взаимно перпендикулярные составляющие, из которых одну совместить с направлением вектора U , а другую провести перпендикулярно ему, то первая из них будет равна $I \cdot \cos \varphi$, т. е. активной составляющей тока, а вторая $I \cdot \sin \varphi$,

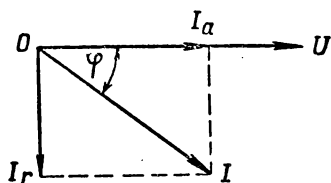


Рис. 252. Векторная диаграмма тока и напряжения для цепи с последовательно соединенными r и L с разложением тока на активную и реактивную составляющие

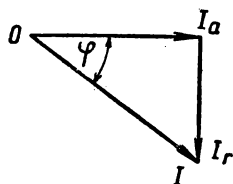


Рис. 253. Треугольник токов

т. е. реактивной составляющей тока. Следовательно, вектор активной составляющей тока I_a совпадает по фазе с приложенным напряжением U , а вектор реактивной составляющей тока I_r сдвинут по фазе по отношению к напряжению U на угол $-\frac{\pi}{2}$.

Выделим из векторной диаграммы треугольник OII_a , называемый **треугольником токов** (рис. 253). Из треугольников токов, применяя теорему Пифагора, получим соотношение между током I и его активной и реактивной составляющими

$$I = \sqrt{(I \cdot \cos \varphi)^2 + (I \cdot \sin \varphi)^2} = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}. \quad (311)$$

Пример 135. В катушке индуктивности ток $I = 12$ а и угол сдвига фаз напряжения и тока $\varphi = 60^\circ$. Определить активную и реактивную составляющие токов, а также активную и реактивную мощность, если напряжение $U = 120$ в.

Решение. Активная составляющая тока

$$I_a = I \cdot \cos \varphi = 12 \cdot \cos 60^\circ = 6 \text{ а.}$$

Реактивная составляющая тока

$$I_r = I \cdot \sin \varphi = 12 \cdot \sin 60^\circ = 12 \cdot 0,866 = 10,4 \text{ а.}$$

Активная мощность

$$P_a = UI_a = 120 \cdot 6 = 720 \text{ вт.}$$

Реактивная мощность

$$P_r = UI_r = 120 \cdot 10,4 = 1248 \text{ ва.}$$

Активная и реактивная составляющие токов физического содержания не имеют, и их надо рассматривать как вспомогательные математические величины, облегчающие расчеты в электрических цепях переменного тока.

§ 114. АКТИВНАЯ И РЕАКТИВНАЯ ПРОВОДИМОСТИ

Допустим, что задана цепь переменного тока, состоящая из последовательно соединенных активного сопротивления r и индуктивности L .

Определим активную составляющую тока для этой цепи, выразив ее через напряжение U и через сопротивления этой цепи.

Как известно,

$$I_a = I \cdot \cos \varphi, \quad (312)$$

где $\cos \varphi = \frac{r}{Z}$,

$Z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}$ — полное сопротивление цепи.

Ток I по закону Ома равен $I = \frac{U}{Z}$.

Следовательно, формулу (312) можно записать так:

$$I_a = I \cdot \cos \varphi = \frac{U}{Z} \cdot \frac{r}{Z},$$

или

$$I_a = U \frac{r}{Z^2}. \quad (313)$$

Выясним размерность величины $\frac{r}{Z^2}$:

$$\left[\frac{r}{Z^2} \right] = \frac{\text{ом}}{\text{ом}^2} = \frac{1}{\text{ом}},$$

т. е. величина $\frac{r}{Z^2}$ имеет размерность проводимости. А так как эта величина входит в формулу для определения активной составляющей тока, то она называется **активной проводимостью** и обозначается буквой g :

$$g = \frac{r}{Z^2}, \quad (314)$$

где g — активная проводимость в $\frac{1}{\text{ом}}$;

r — активное сопротивление цепи в омах;

Z — полное сопротивление цепи в омах.

Из формулы (314) следует, что активная проводимость g не является величиной, обратной активному сопротивлению, так как она зависит не только от активного сопротивления r , но и от индуктивного ωL :

$$g = \frac{r}{Z^2} = \frac{r}{r^2 + (\omega L)^2}.$$

Таким образом, формулу (313) для определения активной составляющей тока можно записать так:

$$I_a = Ug, \quad (315)$$

т. е. активная составляющая тока I_a равна произведению напряжения U на активную проводимость g .

Теперь определим реактивную составляющую тока, выразив ее через напряжение U и сопротивления этой цепи.

Как известно,

$$I_r = I \cdot \sin \varphi, \quad (316)$$

где $\sin \varphi = \frac{\omega L}{Z}$,

и в то же время $I = \frac{U}{Z}$.

Следовательно, формулу (316) можно записать так:

$$I_r = I \cdot \sin \varphi = \frac{U}{Z} \frac{\omega L}{Z},$$

или

$$I_r = U \frac{\omega L}{Z^2}. \quad (317)$$

Выясним размерность величины $\frac{\omega L}{Z^2}$:

$$\left[\frac{\omega L}{Z^2} \right] = \frac{OM}{OM^2} = \frac{1}{OM},$$

т. е. величина $\frac{\omega L}{Z^2}$ имеет размерность проводимости. А так как эта величина входит в формулу для определения реактивной составляющей тока, то она называется **реактивной проводимостью** цепи и обозначается буквой b :

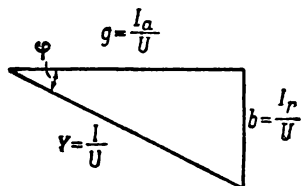
$$b = \frac{\omega L}{Z^2}, \quad (318)$$

где b — реактивная проводимость в $\frac{1}{OM}$;

ωL — индуктивное сопротивление цепи в омах;

Z — полное сопротивление цепи в омах.

Из формулы (318) следует, что реактивная проводимость b не является величиной, обратной реактивному сопротивлению цепи, так как она зависит не только от реактивного сопротивления ωL , но и от активного r :



$$b = \frac{\omega L}{Z^2} = \frac{\omega L}{r^2 + (\omega L)^2}.$$

Таким образом, формулу для определения реактивной составляющей тока можно записать так:

Рис. 254. Треугольник проводимостей

$$I_r = Ub, \quad (319)$$

т. е. реактивная составляющая тока I_r равна произведению напряжения U на реактивную проводимость цепи b .

Если все стороны треугольника токов разделить на напряжение U , то получим так называемый треугольник проводимостей (рис. 254), в котором g — активная проводимость, b — реактивная проводимость и Y — полная проводимость.

Из треугольника проводимостей находим

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2}, \quad (320)$$

т. е. полная проводимость Y равняется корню квадратному из суммы квадратов активной и реактивной проводимостей.

Так как $Y = \frac{I}{U}$, что видно из треугольника проводимостей, то

$$Y = \frac{1}{Z}, \quad (321)$$

т. е. полная проводимость цепи есть величина, обратная ее полному сопротивлению.

В частном случае, если активным сопротивлением цепи можно практически пренебречь, что часто бывает в практике, формулы (314), (318) и (320) приобретают следующий вид:

$$\begin{aligned} g &= \frac{r}{r^2 + (\omega L)^2} = \frac{0}{0 + (\omega L)^2} = 0, \\ b &= \frac{\omega L}{r^2 + (\omega L)^2} = \frac{\omega L}{0 + (\omega L)^2} = \frac{1}{\omega L}, \\ Y &= \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{0 + b^2} = b. \end{aligned}$$

Пример 136. Катушка индуктивности обладает активным сопротивлением $r = 20$ ом и индуктивностью $L = 0,04$ гн. Определить активную, реактивную и полную проводимости катушки, если частота тока в катушке $f = 50$ гц.

Решение. Активная проводимость катушки

$$g = \frac{r}{Z^2} = \frac{r}{r^2 + (\omega L)^2} = \frac{20}{20^2 + (2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,04)^2} = 0,036 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Реактивная проводимость

$$b = \frac{\omega L}{Z^2} = \frac{\omega L}{r^2 + (\omega L)^2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,04}{20^2 + (2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,04)^2} = 0,0225 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Полная проводимость

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{0,036^2 + 0,0225^2} = 0,042 \frac{1}{\text{ом}}.$$

§ 115. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ, УГЛА СДВИГА ФАЗ, МОЩНОСТИ И ВЕЛИЧИНЫ ТОКА В ЦЕПИ ПОСРЕДСТВОМ ЕЕ ПРОВОДИМОСТЕЙ

Если заданы проводимости цепи g , b и Y , то по формулам (314), (318) и (321) можно определить сопротивления цепи:

$$g = \frac{r}{Z^2}, \text{ откуда } r = gZ^2, \text{ или } r = \frac{g}{Y^2}; \quad (322)$$

$$b = \frac{\omega L}{Z^2}, \text{ откуда } \omega L = gZ^2, \text{ или } \omega L = \frac{b}{Y^2}; \quad (323)$$

$$Z = \frac{1}{Y}, \text{ или } Z = \frac{1}{\sqrt{g^2 + b^2}}. \quad (324)$$

По формулам (308) и (310) можно определить мощности через проводимости.

Активная мощность

$$P_a = UI_a.$$

Но согласно формуле (315) $I_a = Ug$, а поэтому

$$P_a = U^2g. \quad (325)$$

Реактивная мощность

$$P_r = UI_r.$$

Но согласно формуле (319) $I_r = Ub$, а поэтому

$$P_r = U^2b. \quad (326)$$

Полная мощность

$$P_i = \sqrt{P_a^2 + P_r^2} = U^2 \sqrt{g^2 + b^2} = U^2Y. \quad (327)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z},$$

а так как $r = \frac{g}{Y^2}$ и $Z = \frac{1}{Y}$, то

$$\cos \varphi = \frac{g}{Y^2 \cdot \frac{1}{Y}} = \frac{g}{Y}. \quad (328)$$

Аналогично найдем выражение и для $\sin \varphi$:

$$\sin \varphi = \frac{x_L}{Z} = \frac{b}{Y^2 \frac{1}{Y}} = \frac{b}{Y}. \quad (329)$$

Из формулы (329) и (328) определим $\operatorname{tg} \varphi$:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{b}{Y} : \frac{g}{Y} = \frac{b}{g}. \quad (330)$$

Величину тока в цепи найдем по формуле

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = U \sqrt{g^2 + b^2} = UY. \quad (331)$$

Пример 137. Активная проводимость цепи $g = 0,04 \frac{1}{\text{ом}}$, реактивная проводимость $b = 0,03 \frac{1}{\text{ом}}$, напряжение, приложенное к цепи, $U = 125$ в. Определить сопротивление цепи, мощность, ток в цепи и сдвиг фаз между током и напряжением.

Решение. Полная проводимость цепи

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{0,04^2 + 0,03^2} = 0,05 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Ток в цепи

$$I = UY = 125 \cdot 0,05 = 6,25 \text{ а.}$$

Активное сопротивление

$$r = \frac{g}{Y^2} = \frac{0,04}{0,05^2} = 16 \text{ ом.}$$

Реактивное сопротивление

$$X = \frac{b}{Y^2} = \frac{0,03}{0,05^2} = 12 \text{ ом.}$$

Активная мощность

$$P_a = U^2 g = 125^2 \cdot 0,04 = 625 \text{ вт.}$$

Реактивная мощность

$$P_r = U^2 b = 125^2 \cdot 0,03 = 468,75 \text{ ва.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{g}{Y} = \frac{0,04}{0,05} = 0,8 \text{ и } \varphi = 36^\circ 50'.$$

§ 116. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПРОВОДИМОСТЕЙ К РАСЧЕТУ ЦЕПИ С ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ КАТУШКАМИ ИНДУКТИВНОСТИ

Для расчета цепей переменного тока с параллельно соединенными потребителями можно воспользоваться векторными диаграммами. Однако этот метод обладает тем недостатком, что он не всегда дает требуемую точность решений. Поэтому при рас-

чете цепей переменного тока обычно прибегают к методам аналитического расчета, например к методу проводимости, символическому методу и др. В данном разделе мы ознакомимся с методом проводимостей, который, как увидим далее, можно успешно применить для расчета параллельных и смешанных цепей переменного тока.

Вначале покажем применение метода проводимостей для расчета параллельной цепи, состоящей из двух параллельно соединенных катушек индуктивности (рис. 249).

Построив векторную диаграмму токов и напряжения (рис. 255), разложим все токи в ней на активные и реактивные составляющие.

Из векторной диаграммы нетрудно видеть, что активная составляющая общего тока равна сумме активных составляющих токов в параллельных ветвях:

$$I \cdot \cos \varphi = I_1 \cdot \cos \varphi_1 + I_2 \cdot \cos \varphi_2 = I_{a1} + I_{a2},$$

или согласно формуле (315)

$$Ug = Ug_1 + Ug_2,$$

откуда, сократив на U , получим

$$g = g_1 + g_2, \quad (332)$$

т. е. активная проводимость g всей параллельной цепи равна сумме активных проводимостей параллельных ветвей ее.

Далее, из векторной диаграммы находим, что

$$I \cdot \sin \varphi = I_1 \cdot \sin \varphi_1 + I_2 \cdot \sin \varphi_2 = I_{r1} + I_{r2},$$

или согласно формуле (319)

$$Ub = Ub_1 + Ub_2,$$

откуда, сократив на U , получим

$$b = b_1 + b_2, \quad (333)$$

т. е. реактивная проводимость цепи равна сумме реактивных проводимостей параллельных ветвей ее.

Полную проводимость всей цепи найдем по формуле (320)

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 + b_2)^2}. \quad (334)$$

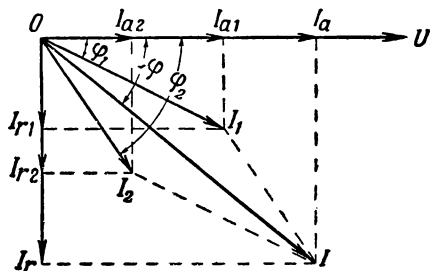


Рис. 255. Векторная диаграмма напряжения и токов для случая параллельного соединения двух катушек индуктивности

Величина тока I в неразветвленном участке цепи будет равна

$$I = UY = UV \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 + b_2)^2}. \quad (335)$$

Активную мощность определим по формуле (325)

$$P_a = U^2 g = U^2 (g_1 + g_2), \quad (336)$$

реактивную мощность — по формуле (326)

$$P_r = U^2 b = U^2 (b_1 + b_2), \quad (337)$$

а коэффициент мощности в цепи — по формуле (328)

$$\cos \varphi = \frac{g}{Y} = \frac{g_1 + g_2}{V \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 + b_2)^2}}. \quad (338)$$

Таким образом, зная активную, реактивную и полную проводимости цепи, нетрудно рассчитать величину тока в неразветвленном участке цепи, мощность, расходуемую в цепи, и сдвиг фаз тока и напряжения, применяя аналитический метод решения задачи при помощи проводимостей.

Пример 138. Две катушки индуктивности, обладающие активными сопротивлениями $r_1 = 30$ ом, $r_2 = 25$ ом и индуктивностями $L_1 = 0,04$ гн и $L_2 = 0,025$ гн, соединены параллельно и подключены к источнику электрической энергии с напряжением $U = 120$ в и угловой частотой $\omega = 1000 \frac{1}{\text{сек}}$. Определить ток в неразветвленном участке цепи, активную и реактивную мощности и сдвиг фаз между общим током и напряжением.

Решение. Активная проводимость первой катушки

$$g_1 = \frac{r_1}{r_1^2 + (\omega L_1)^2} = \frac{30}{30^2 + (1000 \cdot 0,04)^2} = 0,012 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Активная проводимость второй катушки

$$g_2 = \frac{r_2}{r_2^2 + (\omega L_2)^2} = \frac{25}{25^2 + (1000 \cdot 0,025)^2} = 0,02 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Общая активная проводимость цепи

$$g = g_1 + g_2 = 0,012 + 0,02 = 0,032 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Реактивная проводимость первой катушки

$$b_1 = \frac{\omega L_1}{r_1^2 + (\omega L_1)^2} = \frac{1000 \cdot 0,04}{30^2 + (1000 \cdot 0,04)^2} = 0,016 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Реактивная проводимость второй катушки

$$b_2 = \frac{\omega L_2}{r_2^2 + (\omega L_2)^2} = \frac{1000 \cdot 0,025}{25^2 + (1000 \cdot 0,025)^2} = 0,02 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Общая реактивная проводимость цепи

$$b = b_1 + b_2 = 0,016 + 0,02 = 0,036 \frac{1}{\text{ом}}$$

Общая проводимость всей цепи

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{(0,032)^2 + (0,036)^2} = 0,0482 \frac{1}{\text{ом}}$$

Ток неразветвленного участка цепи

$$I = UY = 120 \cdot 0,0482 = 5,78 \text{ а}$$

Активная мощность

$$P_a = U^2 g = 120^2 \cdot 0,032 = 460 \text{ вт}$$

Реактивная мощность

$$P_r = U^2 b = 120^2 \cdot 0,036 = 518 \text{ в.а.}$$

Полная мощность

$$P_l = U^2 Y = 120^2 \cdot 0,0482 = 694 \text{ в.а.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{g}{Y} = \frac{0,032}{0,0482} = 0,664$$

Угол сдвига фаз

$$\varphi = 48^\circ 20'$$

§ 117. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ ИНДУКТИВНОСТЬЮ И ЕМКОСТЬЮ

Допустим, что задана цепь переменного тока, состоящая из двух параллельных ветвей. В одной из них имеется катушка, обладающая индуктивностью L_1 и активным сопротивлением r_1 , а в другой — конденсатор, имеющий емкость C_2 и последовательно с ним соединенное активное сопротивление r_2 (рис. 256). К этой цепи приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, действующее значение которого равно U . Найдем ток в неразветвленном участке цепи, применив для этого метод проводимостей.

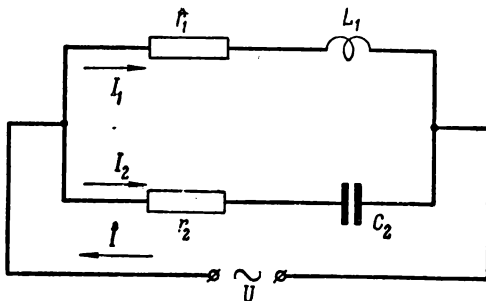


Рис. 256. Схема цепи, состоящей из параллельно соединенных катушки индуктивности и конденсатора

Для построения векторной диаграммы токов и напряжения определим токи в параллельных ветвях и углы сдвига фаз токов и напряжения.

В первой ветви ток I_1 найдем по формуле

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}}.$$

Угол φ_1 сдвига фаз тока I_1 и напряжения U будет положительным, поскольку ток I_1 отстает по фазе от напряжения. Этот угол определим по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\omega L_1}{r_1}.$$

Во второй ветви ток I_2 найдем по формуле

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}}.$$

Угол сдвига фаз тока I_2 и напряжения U будет отрицательным, потому что ток I_2 опережает по фазе напряжение U . Этот угол определим также по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{1}{\omega C_2 r_2}.$$

Определив токи I_1 и I_2 , а также углы φ_1 и φ_2 , построим векторную диаграмму токов и напряжения U (рис. 257). Для этой цели отложим вектор напряжения U по начальной оси, так как по условию начальная фаза напряжения равна нулю. Затем под углом φ_1 к вектору напряжения U отложим вектор тока I_1 , приняв во внимание, что ток I_1 отстает от напряжения U по фазе.

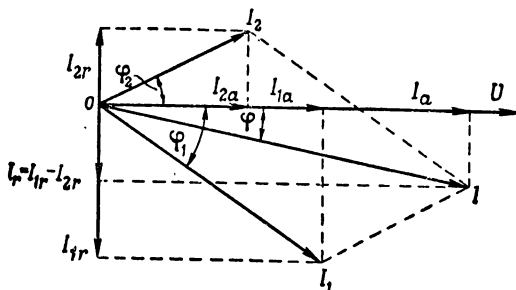


Рис. 257. Векторная диаграмма напряжения и токов для цепи с параллельно соединенными катушкой индуктивности и конденсатором

После этого отложим под углом φ_2 к вектору напряжения U вектор тока I_2 , приняв во внимание, что ток I_2 опережает напряжение U по фазе.

Сложив геометрически векторы токов I_1 и I_2 , получим вектор тока I неразветвленного участка цепи:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 = \bar{I}. \quad (339)$$

Разложим на векторной диаграмме (рис. 257) все токи на активные и реактивные составляющие.

Активные составляющие токов, имеющихся в параллельных ветвях, совпадают по фазе с напряжением U . Их величины определим по формулам

$$I_{1a} = I_1 \cdot \cos \varphi_1 = Ug_1 = U \frac{r_1}{r_1^2 + (\omega L_1)^2},$$

$$I_{2a} = I_2 \cdot \cos \varphi_2 = Ug_2 = U \frac{r_2}{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}.$$

Активная составляющая тока I в неразветвленном участке цепи равна арифметической сумме активных составляющих токов параллельных ветвей:

$$I_a = I_{1a} + I_{2a} = I_1 \cdot \cos \varphi_1 + I_2 \cdot \cos \varphi_2 = U(g_1 + g_2).$$

Реактивная составляющая тока I_1 в катушке индуктивности отстает по фазе от напряжения U на угол $\frac{\pi}{2}$. Ее величину определим по формуле

$$I_{1r} = I_1 \cdot \sin \varphi_1 = Ub_1 = U \frac{\omega L_1}{r_1^2 + (\omega L_1)^2}.$$

Реактивная составляющая тока I_2 в конденсаторе опережает напряжение U по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$. Ее величину определим по формуле

$$I_{2r} = I_2 \cdot \sin \varphi_2 = Ub_2 = U \frac{\frac{1}{\omega C_2}}{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}.$$

Нетрудно видеть, что реактивные составляющие токов параллельных ветвей I_{1r} и I_{2r} находятся в противофазе (сдвинуты по фазе на угол 180°). А это значит, что реактивная составляющая тока в неразветвленном участке цепи равняется разности реактивных составляющих токов I_{1r} и I_{2r} .

В рассматриваемом случае реактивная составляющая тока в первой ветви I_{1r} больше реактивной составляющей тока во второй ветви I_{2r} , что видно из векторной диаграммы (рис. 257).

Следовательно, реактивная составляющая тока I_r в неразветвленном участке цепи равна

$$I_r = I_{1r} - I_{2r} = Ub_1 - Ub_2 = U(b_1 - b_2) = Ub.$$

Отсюда находим

$$b = b_1 - b_2, \quad (340)$$

где b — результирующая реактивная проводимость всей цепи.

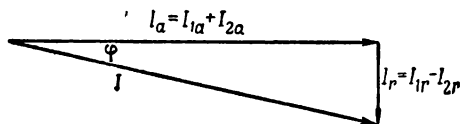


Рис. 258. Треугольник токов

На основании формулы (340) сделаем такой вывод: результирующая реактивная проводимость двух параллельно соединенных ветвей, из которых одна содержит индуктивность, а другая — емкость, равна разности реактивных проводимостей этих ветвей.

Выделим из векторной диаграммы треугольник токов (рис. 258), из которого найдем, что

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{(I_{1a} + I_{2a})^2 + (I_{1r} - I_{2r})^2}. \quad (341)$$

Разделив все стороны треугольника токов на величину напряжения U , получим треугольник проводимостей (рис. 259).

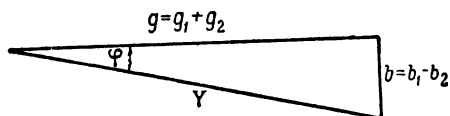


Рис. 259. Треугольник проводимостей

Из треугольника проводимостей находим, что

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}, \quad (342)$$

т. е. полная проводимость равняется корню квадратному из суммы квадратов результирующих активной и реактивной проводимостей.

Общий ток в неразветвленном участке цепи определим по формуле

$$I = UY = UV \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}. \quad (343)$$

Угол сдвига фаз между током I в неразветвленном участке цепи и напряжением U найдем по его тангенсу из треугольника проводимостей:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b_1 - b_2}{g_1 + g_2}, \quad (344)$$

отсюда по тригонометрическим таблицам определим угол φ .

В рассматриваемом случае угол $\varphi > 0$, так как $I_{1r} > I_{2r}$ и, следовательно, $b_1 > b_2$. В соответствии с этим цепь в целом для

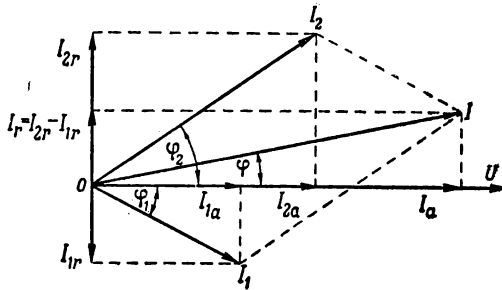


Рис. 260. Векторная диаграмма токов для цепи с параллельно соединенными катушкой индуктивности и конденсатором

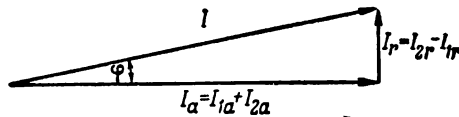


Рис. 261. Треугольник токов

генератора является потребителем с индуктивно-активным характером нагрузки.

Если бы реактивная составляющая тока во второй ветви была больше, чем в первой ($I_{2r} > I_{1r}$), то цепь в целом для генератора являлась бы потребителем с емкостно-активным характером нагрузки. Векторная диаграмма для этого случая изображена на рис. 260, треугольник токов — на рис. 261 и треугольник проводимостей — на рис. 262. В этом случае реактивная проводимость в первой ветви была бы меньше, чем во второй ($b_1 < b_2$). В соответствии с этим результирующая реактивная проводимость в цепи ($b_1 - b_2 < 0$) стала бы отрицательной ве-

личинной. Но так как $(b_1 - b_2)^2 = (b_2 - b_1)^2$ и эти выражения имеют положительные значения, то для определения полной проводимости цепи сохраняется силу формула (342), примененная выше для случая, когда $b_1 > b_2$.

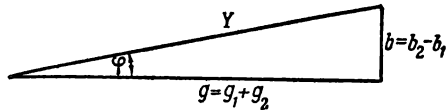


Рис. 262. Треугольник проводимостей

Следовательно, полная проводимость и в данном случае, когда $b_1 < b_2$, определяется по формуле

$$Y = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}$$

и в соответствии с этим ток в неразветвленном участке цепи равен

$$I = UY = U\sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}.$$

Угол сдвига фаз тока I в неразветвленном участке цепи и напряжения U , приложенного к цепи, в данном случае будет отрицательным, так как $b_1 < b_2$:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b_1 - b_2}{g_1 + g_2} < 0,$$

и, следовательно, $\varphi_1 < 0$, т. е. цепь в целом для источника электрической энергии является потребителем с емкостно-активным характером нагрузки.

Полная мощность, развиваемая источником электрической энергии в цепи, равна

$$P_i = UI = U^2 Y. \quad (345)$$

Активная мощность, развиваемая источником электрической энергии в цепи, равна

$$P_a = UI \cdot \cos \varphi = U^2 g = U^2 (g_1 + g_2). \quad (346)$$

Реактивная мощность, развиваемая источником электрической энергии в цепи, равна

$$P_r = UI \cdot \sin \varphi = U^2 b = U^2 (b_1 - b_2). \quad (347)$$

Здесь необходимо обратить внимание на то, что реактивная мощность P_r характеризует колебание энергии между источником электрической энергии и всей цепью и не учитывает местных колебаний энергии между магнитным полем тока катушки

и электрическим полем конденсатора. Это видно из того, что величина реактивной мощности согласно формуле (347) зависит от разности реактивных проводимостей ($b_1 - b_2$), а не от абсолютных значений b_1 и b_2 . Если разность ($b_1 - b_2$) велика, то велика и реактивная мощность, т. е. источник электрической энергии обменивается со всей цепью большим количеством энергии; наоборот, если эта разность мала, то источник обменивается со всей цепью малым количеством энергии.

Максимальное количество энергии, запасаемой магнитным полем катушки, равно

$$W_{m m} = \frac{LI_m^2}{2}.$$

Максимальное количество энергии, запасаемой электрическим полем конденсатора, равно

$$W_{e m} = \frac{CU_m^2}{2}.$$

Если энергия электрического поля конденсатора и энергия магнитного поля катушки относительно велики и при этом численно мало отличаются друг от друга, то местные колебания энергии между этими полями будут более мощными, чем колебания реактивной энергии между всей цепью и генератором электрической энергии.

В этом случае токи в параллельных ветвях могут значительно превысить ток в неразветвленном участке цепи из-за относительно больших величин реактивных составляющих токов в параллельных ветвях по сравнению с реактивной составляющей тока в неразветвленном участке цепи.

Пример 139. К катушке индуктивности, обладающей активным сопротивлением $r_1 = 80$ ом и индуктивностью $L = 0,03$ гн, подключен параллельно конденсатор, имеющий емкость $C = 25$ мкф, и последовательно с ним включено активное сопротивление $r_2 = 20$ ом. Определить токи в параллельных ветвях и в неразветвленном участке цепи, если приложенное к цепи напряжение $U = 120$ в и угловая частота тока $\omega = 2000 \frac{1}{\text{сек}}$ (рис. 256).

Решение. Активная проводимость первой ветви

$$g_1 = \frac{r_1}{r_1^2 + (\omega L)^2} = \frac{80}{80^2 + (2000 \cdot 0,03)^2} = 0,008 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Активная проводимость второй ветви

$$g_2 = \frac{r_2}{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = \frac{20}{20^2 + \left(\frac{1}{2000 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}\right)^2} = 0,025 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Общая активная проводимость всей цепи

$$g = g_1 + g_2 = 0,008 + 0,025 = 0,033 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Реактивная проводимость первой ветви

$$b_1 = \frac{\omega L}{r_1^2 + (\omega L)^2} = \frac{2000 \cdot 0,03}{80^2 + (2000 \cdot 0,03)^2} = 0,006 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Реактивная проводимость второй ветви

$$b_2 = \frac{\frac{1}{\omega C}}{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = \frac{\frac{1}{2000 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}}{20^2 + \left(\frac{1}{2000 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}\right)^2} = 0,025 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Общая реактивная проводимость всей цепи

$$b = b_1 - b_2 = 0,006 - 0,025 = -0,019 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Так как общая реактивная проводимость всей цепи имеет отрицательный знак, то режим в цепи носит емкостный характер, т. е. ток I в неразветвленном участке цепи опережает по фазе приложенное к цепи напряжение U .

Полная проводимость всей цепи

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{(0,033)^2 + (-0,019)^2} = 0,038 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Ток в неразветвленном участке цепи

$$I = UY = 120 \cdot 0,038 = 4,56 \text{ а.}$$

Сдвиг фаз между током и напряжением в неразветвленном участке цепи

$$\text{tg } \varphi = \frac{b}{g} = \frac{-0,019}{0,033} = -0,576.$$

По тригонометрической таблице тангенсов находим

$$\varphi = -30^\circ.$$

Активная мощность, расходуемая в цепи,

$$P_a = U^2 g = 120^2 \cdot 0,033 = 475,2 \text{ вт.}$$

Полная проводимость первой ветви

$$Y_1 = \sqrt{g_1^2 + b_1^2} = \sqrt{(0,008)^2 + (0,006)^2} = 0,01 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Ток в первой ветви

$$I_1 = UY_1 = 120 \cdot 0,01 = 1,2 \text{ а.}$$

Активная мощность, расходуемая в первой ветви,

$$P_{a1} = U^2 g_1 = 120^2 \cdot 0,008 = 115,2 \text{ вт.}$$

Полная проводимость второй ветви

$$Y_2 = \sqrt{g_2^2 + b_2^2} = \sqrt{0,025^2 + 0,025^2} = 0,0354 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Ток во второй ветви

$$I_2 = UY_2 = 120 \cdot 0,0354 = 4,25 \text{ а.}$$

Активная мощность, расходуемая во второй ветви,

$$P_{a2} = U^2 g_2 = 120^2 \cdot 0,025 = 360 \text{ вт.}$$

Сдвиг фаз тока и напряжения в первой ветви

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{b_1}{g_1} = \frac{0,006}{0,008} = 0,75,$$

откуда угол $\varphi_1 = 36^\circ 50'$.

Сдвиг фаз тока и напряжения во второй ветви

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{b_2}{g_2} = \frac{-0,025}{0,025} = -1,$$

откуда угол $\varphi_2 = -45^\circ$.

§ 118. РЕЗОНАНС ТОКОВ

Резонансом токов называется такой режим в цепи переменного тока с параллельно соединенными индуктивностью и емкостью, при котором ток в неразветвленном участке цепи и напряжение, приложенное к этой цепи, совпадают по фазе.

Рассмотрим, при каких условиях может возникнуть резонанс токов, каковы характерные особенности этого явления и какое практическое значение оно имеет в электротехнике.

Допустим, что задана цепь переменного тока, состоящая из катушки индуктивности и конденсатора, так что они вместе с активными сопротивлениями образуют замкнутый контур (рис. 256). Катушка индуктивности обладает активным сопротивлением r_1 и индуктивностью L , а конденсатор — активным сопротивлением r_2 и емкостью C . Генератор, питающий токком данный контур, имеет на своих зажимах синусоидальное напряжение, действующее значение которого равно U и угловая частота ω_0 .

Если в данной цепи возникает резонанс токов, значит, угол сдвига фаз между током I_0 неразветвленного участка цепи и напряжением U , приложенным к цепи, равен нулю, т. е. $\varphi = 0$. Следовательно, и тангенс этого угла должен быть также равен нулю, т. е. $\operatorname{tg} \varphi = 0$.

Подставив в последнее равенство вместо $\operatorname{tg} \varphi$ его выражение, согласно формуле (344) получим

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b_1 - b_2}{g_1 + g_2} = 0, \quad (348)$$

где g_1 и b_1 — соответственно активная и реактивная проводимости параллельной ветви с индуктивностью L и активным сопротивлением r_1 ;

g_2 и b_2 — соответственно активная и реактивная проводимости параллельной ветви с емкостью C и активным сопротивлением r_2 .

Равенство (348) справедливо только в том случае, когда $b_1 - b_2 = 0$, т. е. когда

$$b_1 = b_2, \quad (349)$$

так как в этом случае

$$\operatorname{tg} \frac{0}{g_1 + g_2} = \operatorname{tg} 0 = 0.$$

Принимая во внимание равенство (349), можно сделать такой вывод: резонанс токов возникает в контуре в том случае, если реактивные составляющие проводимости параллельных ветвей с индуктивностью и емкостью численно равны друг другу.

Помножив левую и правую части равенства (349) на действующее значение напряжения U , приложенного к цепи, получим равенство

$$Ub_1 = Ub_2,$$

или, иначе,

$$I_{r1} = I_{r2}, \quad (350)$$

где $I_{r1} = Ub_1$ — реактивная составляющая тока в параллельной ветви с индуктивностью;

$I_{r2} = Ub_2$ — реактивная составляющая тока в параллельной ветви с емкостью.

Из равенства (350) следует, что при резонансе токов реактивные составляющие токов параллельных ветвей с индуктивностью и емкостью равны друг другу.

Как известно, ток в неразветвленном участке рассматриваемой цепи в общем случае определяется по формуле (343)

$$I = UV \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}.$$

Принимая во внимание, что при резонансе токов $b_1 - b_2 = 0$, получим

$$I_0 = UV \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + 0},$$

или, иначе,

$$I_0 = U(g_1 + g_2) = Ug_1 + Ug_2 = I_{a1} + I_{a2}, \quad (351)$$

где $I_{a1} = Ug_1$ — активная составляющая тока в параллельной ветви с индуктивностью;

$I_{a2} = Ug_2$ — активная составляющая ветви с емкостью.

Следовательно, ток в неразветвленном участке цепи при резонансе токов равен сумме активных составляющих токов в параллельных ветвях.

На рис. 263 приведена векторная диаграмма токов и напряжения для рассматриваемого случая резонанса токов. Здесь вектор U приложенного к резонансному контуру напряжения направлен по начальной оси, так как начальная фаза его принята равной нулю. Вектор тока I_1 параллельной ветви с индуктивностью отстает по фазе на угол φ_1 от напряжения U , а вектор тока I_2 параллельной ветви с емкостью опережает по фазе на угол φ_2 на напряжение U . Реактивные составляющие токов параллельных ветвей I_{r1} и I_{r2} равны по абсолютной величине, но находятся в противофазе. Вектор тока I_0 неразветвленного участка цепи совпадает по фазе с напряжением U и равен по абсолютной величине сумме активных составляющих токов I_{1a} и I_{2a} параллельных ветвей.

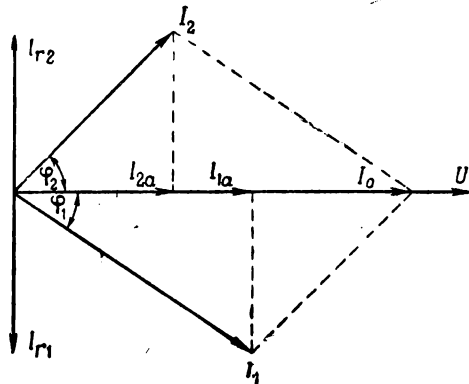


Рис. 263. Векторная диаграмма токов и напряжения для случая резонанса токов

Теперь определим резонансную частоту, т. е. ту частоту, при которой при заданных параметрах цепи r_1 , L , r_2 и C наступает резонанс токов. Для этой цели воспользуемся равенством (349)

$$b_1 = b_2,$$

или, иначе,

$$\frac{\omega_0 L}{r_1^2 + (\omega_0 L)^2} = \frac{1}{\omega_0 C} \cdot \frac{1}{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega_0 C}\right)^2}.$$

Отсюда после несложных преобразований получим

$$\omega_0^2 LC \left[r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega_0 C}\right)^2 \right] = r_1^2 + (\omega_0 L)^2,$$

или

$$\omega_0^2 LC r_2^2 + \frac{L}{C} = r_1^2 + \omega_0^2 L^2,$$

или

$$\omega_0^2 (LC r_2^2 - L^2) = r_1^2 - \frac{L}{C},$$

откуда находим, что

$$\omega_0^2 = \frac{r_1^2 - \frac{L}{C}}{LC \left(r_2^2 - \frac{L}{C} \right)},$$

или

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 - \frac{L}{C}}{r_2^2 - \frac{L}{C}}}, \quad (352)$$

где ω_0 — резонансная угловая частота.

В соответствии с этим резонансная частота

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 - \frac{L}{C}}{r_2^2 - \frac{L}{C}}}. \quad (353)$$

Исследуем формулу (352) для определения резонансной угловой частоты ω_0 , рассмотрев несколько частных случаев.

Первый случай. Допустим, что активные сопротивления параллельных ветвей с индуктивностью и емкостью равны друг другу:

$$r_1 = r_2 = r.$$

Тогда резонансная угловая частота ω_0 равна

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r^2 - \frac{L}{C}}{r^2 - \frac{L}{C}}} = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (354)$$

т. е. в данном случае формула для определения резонансной угловой частоты ω_0 совершенно сходна с формулой для определения резонансной частоты при резонансе напряжений.

Второй случай. Допустим, соотношение параметров параллельной цепи таково, что выполняется следующее равенство:

$$r_1^2 = r_2^2 = r^2 = \frac{L}{C}.$$

Тогда формула (352) принимает вид

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r^2 - \frac{L}{C}}{r^2 - \frac{L}{C}}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \frac{0}{0} = \frac{0}{0}. \quad (355)$$

Мы получили неопределенную величину. Это значит, что при заданных значениях параметров r_1 , r_2 , L и C резонанс токов в контуре наступит при любой частоте ω .

Третий случай. Допустим, соотношение параметров параллельной цепи таково, что $r_1^2 < \frac{L}{C}$ и $r_2^2 > \frac{L}{C}$.

Тогда подкоренное выражение $\frac{r_1^2 - \frac{L}{C}}{r_2^2 - \frac{L}{C}}$ в формуле (352) отрицательно, а следовательно, ω_0 будет величиной мнимой:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 - \frac{L}{C}}{r_2^2 - \frac{L}{C}}} = j \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - r_1^2}{r_2^2 - \frac{L}{C}}}, \quad (356)$$

где $j = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Значит, при заданном соотношении параметров параллельной цепи резонанс токов невозможен ни при какой частоте.

Пример 140. В цепи, схема которой изображена на рис. 256, $L = 0,01$ гн и $C = 100$ мкф. Определить резонансную частоту контура для следующих четырех вариантов:

- 1) $r_1 = 8$ ом, $r_2 = 6$ ом;
- 2) $r_1 = 8$ ом, $r_2 = 8$ ом;
- 3) $r_1 = 10$ ом, $r_2 = 10$ ом;
- 4) $r_1 = 12$ ом, $r_2 = 8$ ом.

Решение. По формуле (352) находим:

Первый вариант

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 - \frac{L}{C}}{r_2^2 - \frac{L}{C}}} = \frac{1}{\sqrt{0,01 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}} \sqrt{\frac{8^2 - \frac{0,01}{100 \cdot 10^{-6}}}{6^2 - \frac{0,01}{100 \cdot 10^{-6}}}} = \\ &= \frac{1}{0,001} \sqrt{\frac{-36}{-64}} = 1000 \cdot \frac{6}{8} = 750 \frac{1}{\text{сек}}. \end{aligned}$$

Второй вариант

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 - \frac{L}{C}}{r_2^2 - \frac{L}{C}}} = \frac{1}{\sqrt{0,01 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}} \sqrt{\frac{8^2 - \frac{0,01}{100 \cdot 10^{-6}}}{8^2 - \frac{0,01}{100 \cdot 10^{-6}}}} = \\ &= \frac{1}{0,001} = 1000 \frac{1}{\text{сек}}. \end{aligned}$$

Третий вариант

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 - \frac{L}{C}}{r_2^2 - \frac{L}{C}}} = \frac{1}{\sqrt{0,01 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}} \sqrt{\frac{10^2 - \frac{0,01}{100 \cdot 10^{-6}}}{10^2 - \frac{0,01}{100 \cdot 10^{-6}}}} = \\ &= \frac{1}{0,001} \cdot \frac{0}{0} = \frac{0}{0}, \end{aligned}$$

т. е. резонанс токов возможен при любой частоте,

Четвертый вариант

$$\begin{aligned}\omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{r_1^2 - \frac{L}{C}}{r_2^2 - \frac{L}{C}}} = \frac{1}{\sqrt{0,01 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}} \sqrt{\frac{12^2 - \frac{0,01}{100 \cdot 10^{-6}}}{8^2 - \frac{0,01}{100 \cdot 10^{-6}}}} = \\ &= \frac{1}{0,001} \sqrt{-\frac{44}{36}} = 1105 \sqrt{-1},\end{aligned}$$

т. е. резонанс токов невозможен ни при какой частоте.

На практике чаще всего приходится иметь дело с резонансными контурами, в которых активное сопротивление в параллельной ветви с емкостью равно нулю ($r_2 = 0$), а активное сопротивление r_1 в параллельной ветви с индуктивностью значительно меньше реактивного сопротивления ее при резонансе токов, т. е. $r_1 \ll \omega_0 L$. Рассмотрим подобный контур (рис. 264) и проанализируем явление резонанса токов в нем.

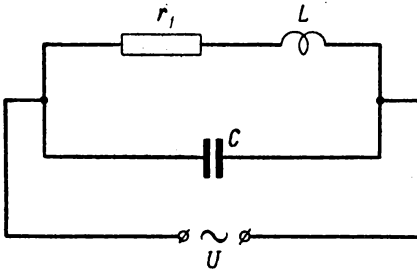


Рис. 264. Резонансный контур

Если в таком контуре активное сопротивление в параллельной ветви с индуктивностью значительно меньше индуктивного сопротивления ее при резонансе токов, т. е. $r_1 \ll \omega_0 L$, то с достаточной точностью можно считать, что реактивная проводимость этой ветви при резонансе токов равна

$$b_1 = \frac{\omega_0 L}{r_1^2 + (\omega_0 L)^2} \approx \frac{\omega_0 L}{(\omega_0 L)^2} = \frac{1}{\omega_0 L}. \quad (357)$$

Реактивная проводимость параллельной ветви с емкостью в данном случае равна

$$b_2 = \frac{\frac{1}{\omega_0 C}}{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega_0 C}\right)^2} = \frac{\frac{1}{\omega_0 C}}{\left(\frac{1}{\omega_0 C}\right)^2} = \omega_0 C, \quad (358)$$

так как по условию $r_2 = 0$.

Условием возникновения резонанса токов является равенство реактивных проводимостей параллельных ветвей контура, т. е.

$$b_1 = b_2,$$

или согласно формулам (357) и (358)

$$\frac{1}{\omega_0 L} = \omega_0 C, \quad (359)$$

Из равенства (359) определим резонансную угловую частоту:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (360)$$

Следовательно, если активное сопротивление параллельной ветви с индуктивностью значительно меньше реактивного сопротивления ее, а активное сопротивление ветви с конденсатором практически равно нулю, то угловая резонансная частота контура определяется формулой, совершенно сходной с формулой для определения резонансной угловой частоты при резонансе напряжений. Это значит, что в данном случае резонансная угловая частота контура равняется угловой частоте собственных незатухающих колебаний его.

Чем меньше активное сопротивление r_1 параллельной ветви с индуктивностью по сравнению с ее индуктивным сопротивлением $\omega_0 L$ при резонансе токов, тем более точной становится формула (360). Если, например, r_1 меньше $\omega_0 L$ в десятки раз, то погрешность расчета угловой резонансной частоты ω_0 по формуле (360) составит менее одного процента.

Так как по условию $r_1 \ll \omega_0 L$, то и активная составляющая проводимости g_1 ветви с индуктивностью будет значительно меньше реактивной составляющей b_1 этой ветви. Ведь если

$$r_1 \ll \omega_0 L, \text{ то } \frac{r_1}{r_1^2 + (\omega_0 L)^2} \ll \frac{\omega_0 L}{r_1^2 + (\omega_0 L)^2},$$

или, иначе, $g_1 \ll b_1$. А если это так, то и активная составляющая тока I_{a1} в параллельной ветви с индуктивностью должна быть значительно меньше реактивной составляющей тока I_{r1} в этой ветви, поскольку при $g_1 \ll b_1$

$$Ug_1 \ll Ub_1,$$

или, иначе,

$$I_{a1} \ll I_{r1}.$$

Следовательно, при $r_1 \ll \omega_0 L$ величину тока I_1 в параллельной ветви с индуктивностью с достаточной точностью можно считать равной его реактивной составляющей I_{r1} , т. е.

$$I_1 \approx I_{r1}.$$

А так как реактивные составляющие токов в параллельных ветвях с индуктивностью и емкостью при резонансе токов равны, то в нашем случае, когда $r_1 \ll \omega_0 L$ и $r_2 = 0$, токи I_1 и I_2 в этих ветвях практически равны друг другу:

$$I_1 \approx I_2.$$

Как уже упоминалось, ток I_0 в неразветвленном участке цепи при резонансе токов равен сумме активных составляющих токов параллельных ветвей, т. е.

$$I_{a1} + I_{a2} = I_0.$$

Но в данном случае активная составляющая тока в параллельной ветви с емкостью равна нулю, поскольку

$$I_{a2} = Ug_2 = U \frac{r_2}{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega_0 C}\right)^2} = U \frac{0}{0 + \left(\frac{1}{\omega_0 C}\right)^2} = 0.$$

Следовательно, ток в неразветвленном участке цепи будет равен активной составляющей тока в параллельной ветви с индуктивностью, т. е.

$$I_0 = I_{a1} = Ug_1 = \frac{Ur_1}{r_1^2 + (\omega_0 L)^2} \approx U \frac{r_1}{(\omega_0 L)^2},$$

так как $r_1 \ll \omega_0 L$ и, следовательно, $g_1 = \frac{r_1}{(\omega_0 L)^2}$.

Но активная составляющая тока I_{a1} в параллельной ветви значительно меньше всего тока I_1 этой ветви; поэтому ток в неразветвленном участке цепи при резонансе токов значительно меньше токов параллельных ветвей с индуктивностью и емкостью, если $r_1 \ll \omega_0 L$ и $r_2 = 0$, т. е.

$$I_0 \ll I_1 \approx I_2.$$

По той причине, что при резонансе токов реактивные составляющие токов параллельных ветвей с индуктивностью и емкостью взаимно компенсируются, а токи в этих ветвях обычно значительно больше тока в неразветвленном участке цепи, этот электрический резонанс и назван резонансом токов.

На рис. 265 приведена векторная диаграмма для рассматриваемого случая, когда в резонансном контуре $r_1 \ll \omega_0 L$ и $r_2 = 0$.

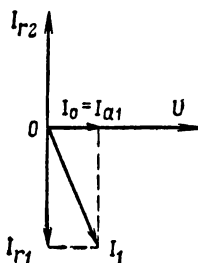


Рис. 265. Векторная диаграмма для случая резонанса токов

Пример 141. Цепь составлена из параллельно соединенных катушки индуктивности, обладающей индуктивностью $L = 5 \cdot 10^{-4}$ гн и активным сопротивлением $r_1 = 5$ ом, а также конденсатора, обладающего емкостью $C = 2 \cdot 10^{-9}$ ф и активным сопротивлением, практически равным нулю (рис. 264). Требуется определить режим при резонансе токов в данной цепи, если к ней приложено синусоидальное напряжение, действующее значение которого $U = 120$ в.

Решение. Определяем резонансную угловую частоту по формуле (360)

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{5 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-9}}} = 10^6 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Индуктивное сопротивление катушки индуктивности при резонансе токов равно $\omega_0 L = 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 500 \text{ ом}$, т. е. оно в сто раз больше активного сопротивления $r_1 = 5 \text{ ом}$ катушки, а поэтому мы были вправе применить формулу (360) для определения резонансной угловой частоты ω_0 .

Реактивная проводимость параллельной ветви с индуктивностью согласно формуле (357) равна

$$b_1 = \frac{1}{\omega_0 L} = \frac{1}{10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 0,002 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Активная составляющая проводимости в параллельной ветви с индуктивностью согласно неравенству $r_1 \ll \omega_0 L$ равна

$$g_1 = \frac{r_1}{(\omega_0 L)^2} = \frac{5}{(10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-4})^2} = \frac{5}{25 \cdot 10^4} = 0,00002 \frac{1}{\text{ом}}.$$

Реактивная составляющая тока в параллельной ветви с индуктивностью равна

$$I_{r1} = U b_1 = 120 \cdot 0,002 = 0,24 \text{ а.}$$

Активная составляющая тока в параллельной ветви с индуктивностью равна

$$I_{a1} = U g_1 = 120 \cdot 0,00002 = 0,0024 \text{ а,}$$

т. е. она меньше реактивной составляющей тока I_{r1} в сто раз.

Реактивная составляющая тока в параллельной ветви с емкостью равна

$$I_{r2} = U b_2 = U \omega C_2 = 120 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-9} = 0,24 \text{ а,}$$

т. е. она равна реактивной составляющей тока в параллельной ветви с индуктивностью, что и следовало ожидать при резонансе токов.

Активная составляющая тока в параллельной ветви с емкостью равна нулю, так как

$$I_{a2} = U g_2 = U \cdot 0 = 0.$$

Ток I_1 в параллельной ветви с индуктивностью равен

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{r1}^2} = \sqrt{0,0024^2 + 0,24^2} \approx 0,24 \text{ а,}$$

т. е. он практически равен своей реактивной составляющей.

Ток I_2 в параллельной ветви с емкостью равен

$$I_2 = \sqrt{I_{a2}^2 + I_{r2}^2} = \sqrt{0 + 0,24^2} = 0,24 \text{ а.}$$

Следовательно, в рассматриваемом случае токи в параллельных ветвях при резонансе токов практически равны: $I_1 = I_2 = 0,24 \text{ а}$.

Ток в неразветвленном участке цепи I_0 равен активной составляющей тока в параллельной ветви с индуктивностью, так как активная составляющая тока в параллельной ветви с емкостью равна нулю:

$$I_0 = I_{a1} = 0,0024 \text{ а,}$$

т. е. ток I_0 в неразветвленном участке цепи в данном случае в сто раз меньше тока в каждой из параллельных ветвей резонансного контура.

Теперь определим полное сопротивление резонансного контура при резонансе токов по отношению к генератору, питающему этот контур энергией. Для этой цели используем формулу

$$I_0 = I_{a1} = U g_1;$$

отсюда находим, что

$$Z_{\text{рез}} = \frac{U}{I_0} = \frac{1}{g_1},$$

т. е. резонансное сопротивление контура по отношению к генератору при $r_1 \ll \omega_0 L$ и $r_2 = 0$ является величиной, обратной активной проводимости параллельной ветви с индуктивностью.

Подставив вместо g_1 его выражение в последнее равенство, получим

$$Z_{\text{рез}} = \frac{1}{g_1} = \frac{1}{\frac{r_1}{r_1^2 + (\omega_0 L)^2}} \approx \frac{1}{\frac{r_1}{(\omega_0 L)^2}} = \frac{(\omega_0 L)^2}{r_1},$$

так как $r_1 \ll \omega_0 L$.

В рассматриваемом случае

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

а поэтому последнему равенству можем придать такой вид:

$$Z_{\text{рез}} = \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{LC}} L\right)^2}{r_1},$$

или, иначе,

$$Z_{\text{рез}} = \frac{L}{r_1 C}, \quad (361)$$

где $Z_{\text{рез}}$ — резонансное сопротивление контура в омах;

L — индуктивность контура в генри;

C — емкость контура в фарадах;

r_1 — активное сопротивление контура в омах.

Исходя из формулы (361), можно сделать следующий вывод: резонансное сопротивление контура по отношению к генератору при $r_1 \ll \omega_0 L$ и $r_2 = 0$ обратно пропорционально активному сопротивлению r_1 параллельной ветви с индуктивностью, т. е. чем меньше это активное сопротивление, тем больше резонансное сопротивление контура.

В пределе, когда активное сопротивление r_1 контура равно нулю, резонансное сопротивление $Z_{\text{рез}}$ контура становится равным бесконечности и в соответствии с этим ток I_0 в неразвет-

влённом участке цепи становится равным нулю. В этом идеальном случае электромагнитные колебания в контуре будут независимы от источника электрической энергии, т. е. в контуре будут существовать собственные незатухающие колебания.

Чем больше активное сопротивление резонансного контура, тем больше в нем потерь энергии на необратимые процессы (выделение тепла в активном сопротивлении) за каждый период, тем, следовательно, больше энергии должен доставлять источник в контур, чтобы поддержать в нем вынужденные незатухающие колебания. Поэтому генератор с ростом активного сопротивления контура должен посылать больший ток, что и осуществляется в результате уменьшения резонансного сопротивления при возрастании активного сопротивления.

Пример 142. Резонансный контур имеет индуктивность $L = 8 \cdot 10^{-4}$ гн, емкость $C = 12,5 \cdot 10^{-8}$ ф и активное сопротивление $r_1 = 2$ ом. Требуется определить резонансное сопротивление $Z_{\text{рез}}$ контура и величину тока I_0 в неразветвленном участке цепи, если действующее значение напряжения, приложенного к цепи, $U = 80$ в.

Решение. Резонансное сопротивление контура согласно формуле (361) равно

$$Z_{\text{рез}} = \frac{L}{r_1 C} = \frac{8 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 12,5 \cdot 10^{-8}} = 3200 \text{ ом.}$$

Ток в неразветвленном участке цепи равен

$$I_0 = \frac{U}{Z_{\text{рез}}} = \frac{80}{3200} = 0,025 \text{ а.}$$

Так как по условию $r_1 \ll \omega_0 L$ и в соответствии с этим резонансная угловая частота $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, то индуктивное сопротивление параллельной ветви контура с индуктивностью для случая резонанса токов можно выразить следующей формулой:

$$x_{L0} = \omega_0 L = \frac{1}{\sqrt{LC}} L,$$

или, иначе,

$$x_{L0} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (362)$$

Аналогично этому емкостное сопротивление параллельной ветви контура с емкостью для случая резонанса токов можно выразить формулой

$$x_{C0} = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{LC}} C},$$

или, иначе,

$$x_{C0} = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (363)$$

Следовательно, если в резонансном контуре $r_1 \ll \omega_0 L$, то индуктивное и емкостное сопротивления параллельных ветвей контура при резонансе токов численно равны друг другу и равны порознь волновому сопротивлению контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (364)$$

где ρ — волновое сопротивление резонансного контура в омах;
 L — индуктивность в генри;
 C — емкость в фарадах.

Выразим вышеприведенные основные формулы, характеризующие режим в резонансном контуре при резонансе токов, через волновое сопротивление.

Резонансное сопротивление контура согласно формуле (361) равно

$$Z_{\text{рез}} = \frac{L}{rC} = \frac{\rho^2}{r}. \quad (365)$$

Ток в неразветвленном участке цепи при резонансе токов равен

$$I_0 = \frac{U}{Z_{\text{рез}}} = \frac{U}{\frac{\rho^2}{r}} = U \frac{r}{\rho^2}. \quad (366)$$

Ток в параллельной ветви с индуктивностью, где $r_1 \ll \omega_0 L$, равен

$$I_1 \approx \frac{U}{\omega_0 L} = \frac{U}{\rho}. \quad (367)$$

Ток в параллельной ветви с емкостью равен

$$I_2 = \frac{U}{\frac{1}{\omega_0 C}} = \frac{U}{\rho}. \quad (368)$$

Разделив величину тока I_1 на величину тока I_0 , получим

$$\frac{I_1}{I_0} = \frac{U}{\rho} : \frac{Ur}{\rho^2} = \frac{\rho}{r_1}.$$

Аналогично этому, разделив величину тока I_2 на величину тока I_0 , получим

$$\frac{I_2}{I_0} = \frac{U}{\rho} : \frac{Ur}{\rho^2} = \frac{\rho}{r_1}.$$

Следовательно, токи в параллельных ветвях резонансного контура I_1 и I_2 при резонансе токов порознь во столько раз больше тока I_0 неразветвленного участка цепи, во сколько раз волновое сопротивление контура ρ больше его активного сопротивления r .

Но, как известно, отношение волнового сопротивления ρ контура к его активному сопротивлению r_1 — это добротность (качество) контура

$$Q = \frac{\rho}{r_1},$$

где Q — добротность (качество) контура.

Следовательно, добротность Q контура — это величина, показывающая, во сколько раз ток в резонансном контуре больше тока в неразветвленном участке цепи при резонансе токов:

$$\frac{I_1}{I_0} \approx \frac{I_2}{I_0} = Q. \quad (369)$$

Величина, обратная добротности (качеству) резонансного контура, называется затуханием контура (d):

$$d = \frac{1}{Q},$$

или, иначе,

$$d = \frac{I_0}{I_1} \approx \frac{I_0}{I_2}, \quad (370)$$

т. е. затухание резонансного контура — это величина, показывающая, какую долю тока контура составляет ток в неразветвленном участке цепи при резонансе токов.

Пример 143. Резонансный контур составлен из катушки индуктивности, обладающей индуктивностью $L = 3 \cdot 10^{-5}$ гн и активным сопротивлением $r_1 = 1$ ом, и параллельно соединенного с катушкой конденсатора, имеющего емкость $C = 3 \cdot 10^{-9}$ ф и активное сопротивление $r_2 = 0$. Определить волновое сопротивление, добротность, затухание контура, а также ток в неразветвленном участке цепи и ток в контуре, если действующее значение приложенного к данной цепи синусоидального напряжения $U = 20$ в.

Решение. Волновое сопротивление контура

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-5}}{3 \cdot 10^{-9}}} = 100 \text{ ом.}$$

Добротность контура

$$Q = \frac{\rho}{r} = \frac{100}{1} = 100.$$

Затухание контура

$$d = \frac{1}{Q} = \frac{1}{100} = 0,01.$$

Ток в неразветвленном участке цепи согласно формуле (366) равен

$$I_0 = U \frac{r}{\rho^2} = 20 \cdot \frac{1}{100^2} = 0,002 \text{ а.}$$

Ток в колебательном контуре

$$I_1 \approx I_2 = QI_0 = 100 \cdot 0,002 = 0,2 \text{ а.}$$

Так как резонансный контур для генератора электрической энергии представляет нагрузочное сопротивление чисто активного характера, то активная мощность, развиваемая им в резонансном контуре, может быть определена по формуле

$$P_a = UI_0 = 20 \cdot 0,002 = 0,04 \text{ вт.}$$

Реактивная мощность, развиваемая в каждой из параллельных ветвей контура, равна

$$P_r = UI_1 \approx UI_2 = 20 \cdot 0,2 = 4 \text{ ва.}$$

Таким образом, в рассматриваемом случае, когда $r_1 \ll \omega_0 L$, реактивная мощность в контуре значительно больше активной.

Пример 144. Резонансный контур обладает волновым сопротивлением $\rho = 160 \text{ ом}$ и активным сопротивлением $r_1 = 2 \text{ ом}$. Требуется определить активную и реактивную мощность в контуре при резонансе токов, если действующее значение напряжения, приложенного к цепи, $U = 127 \text{ в}$.

Решение. Резонансное сопротивление контура

$$Z_{\text{рез}} = \frac{\rho^2}{r} = \frac{160^2}{2} = 12800 \text{ ом.}$$

Ток в неразветвленном участке цепи

$$I_0 = \frac{U}{Z_{\text{рез}}} = \frac{127}{12800} \approx 0,01 \text{ а.}$$

Добротность контура

$$Q = \frac{\rho}{r_1} = \frac{160}{2} = 80.$$

Ток в резонансном контуре

$$I_1 \approx I_2 = QI_0 = 80 \cdot 0,01 = 0,8 \text{ а.}$$

Активная мощность, развиваемая генератором в резонансном контуре, равна

$$P_a = UI_0 = 127 \cdot 0,01 = 1,27 \text{ вт.}$$

Реактивная мощность в контуре

$$P_r = UI_1 = 127 \cdot 0,8 = 102 \text{ ва,}$$

т. е. она больше активной мощности в 80 раз.

В отличие от резонанса напряжений при резонансе токов сумма энергий электрического и магнитного полей контура не является постоянной величиной. Это значит, что имеются такие промежутки времени, когда энергия электрического и магнитного полей контура расходуется частично или полностью в активном сопротивлении контура, и, следовательно, имеются также такие

промежутки времени, когда генератор электрической энергии пополняет запас энергии, израсходованной электрическим и магнитным полями контура. Однако обмена реактивной энергией между генератором электрической энергии и магнитным полем контура здесь не происходит. Генератор в общей сложности за период доставляет в контур такое количество энергии, которое было израсходовано в активном сопротивлении контура.

В частном случае, когда активными сопротивлениями контура можно пренебречь, в контуре совершается обмен энергией между электрическим и магнитным полями. При этом сумма энергий электрического и магнитного полей сохраняется для любого момента времени постоянной по величине, а максимальные энергии этих полей численно равны друг другу:

$$W_{mm} = \frac{L_m^2}{2} = \frac{CU_m^2}{2} = W_{em} \quad (371)$$

где W_{mm} — максимальная магнитная энергия;

W_{em} — максимальная электрическая энергия.

Весьма большое значение для практики имеют резонансные кривые токов, отображающие графически зависимость токов в цепи от частоты вынужденных колебаний.

На рис. 266 приведены графики зависимости тока I неразветвленного участка цепи, тока I_1 параллельной ветви с индуктивностью и тока I_2 параллельной ветви с емкостью от частоты вынужденных колебаний в контуре для случая, когда активное сопротивление катушки относительно мало, а активное сопротивление ветви конденсатора равно нулю. Здесь график тока I_1 изображен гиперболой, поскольку ток I_1 изменяется практически обратно пропорционально частоте. При $\omega = 0$ $I_1 = \frac{U}{r_1}$, а при $\omega = \infty$ $I_1 = 0$. График зависимости тока I_2 от частоты изображен прямой линией, так как ток I_2 изменяется пропорционально частоте. При $\omega = 0$ $I_2 = 0$, а при $\omega \rightarrow \infty$ $I_2 \rightarrow \infty$. График зависимости тока I от частоты (резонансная кривая) изображен в виде U-образной кривой. При $\omega = 0$ $I = \frac{U}{r_1}$, а при $\omega \rightarrow \infty$ $I \rightarrow \infty$; при $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, где ω_0 — резонансная частота, ток I имеет минимальную величину. Чем меньше активное сопротивление r_1

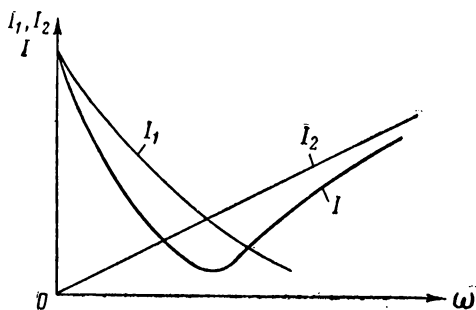


Рис. 266. Графики изменения токов I_1, I_2 и I при изменении угловой частоты ω

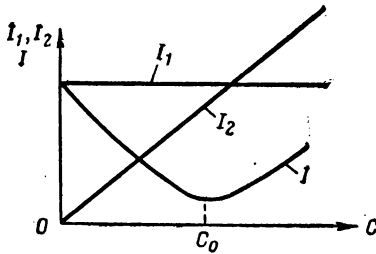


Рис. 267. Графики изменения токов I_1 , I_2 и I при изменении емкости от нуля до бесконечности

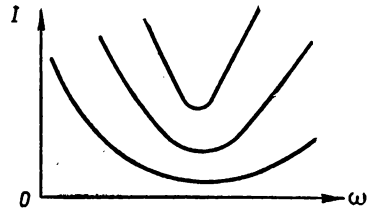


Рис. 268. Резонансные кривые для контуров с различными потерями энергии: чем больше активное сопротивление контура, тем более пологая кривая

контура, тем меньше ток I при резонансе токов, и в идеальном случае, когда $r_1 = 0$, кривая тока I будет в точке $\omega = \omega_0$ соприкасаться с осью ω .

На рис. 267 представлены графики зависимости токов I , I_1 и I_2 резонансной цепи от емкости контура. Здесь график тока I_1 (ток ветви с индуктивностью) изображен прямой линией, параллельной оси емкости C , так как $I_1 = \text{const}$, т. е. не зависит от емкости C при постоянстве действующего значения синусоидального напряжения, приложенного к цепи. График тока I_2 (ток в ветви конденсатора) изображен также прямой линией, так как этот ток изменяется пропорционально емкости ($I_2 = U\omega C$). График тока I (резонансная кривая) изображен в виде U-образной кривой. При $\omega = 0$ $I = \frac{U}{r_1}$, при $\omega \rightarrow \infty$ $I \rightarrow \infty$ и при резонансной емкости $C_0 = \frac{1}{\omega^2 L}$ ток I имеет минимальную величину.

Если при всех прочих равных условиях изменять активное сопротивление контура, то резонансная кривая этого контура также будет изменяться: при увеличении сопротивления она станет более полой, а при уменьшении его — более остроконечной. На рис. 268 приведено несколько резонансных кривых тока для контуров с различными активными сопротивлениями.

Явление резонанса токов широко используется в радиотехнических цепях. Здесь резонансный контур обычно питается от генератора электрической энергии, обладающего весьма большим внутренним сопротивлением, например, от генераторной или усилительной электронной лампы. Если внутреннее сопротивление генератора, питающего резонансный контур, значительно больше резонансного сопротивления контура, то последний приобретает резко выраженные резонансные свойства. Допустим, что внутреннее сопротивление генератора R_i постоянно независимо от частоты электрических колебаний в цепи, т. е. $R_i = \text{const}$, и при этом оно значительно больше сопротивления контура Z , т. е.

$R_i \gg Z$. В соответствии с этим ток I в неразветвленном участке цепи сохраняется практически неизменным по величине при изменении частоты электрических колебаний в контуре, так как электродвижущая сила генератора не зависит от частоты электрических колебаний. Следовательно,

$$I = \frac{E}{R_i + Z} \approx \frac{E}{R_i} = \text{const},$$

где I — ток в неразветвленном участке цепи;
 E — электродвижущая сила генератора;
 Z — сопротивление колебательного контура;
 R_i — внутреннее сопротивление генератора.

Если изменять частоту электрических колебаний в контуре, то сопротивление контура начнет резко изменяться, достигая максимума при резонансе токов. Но поскольку ток неразветвленного участка цепи $I = \text{const}$, то с изменением сопротивления колебательного контура будет соответственно изменяться и напряжение на зажимах контура

$$U = IZ,$$

где U — напряжение на зажиме контура;
 I — ток в неразветвленном участке цепи;
 Z — сопротивление контура.

А так как сопротивление контура при резонансе токов (резонансное сопротивление) относительно велико, то велико и напряжение на контуре. В соответствии с этим становятся большими и токи в параллельных ветвях резонансного контура, потому что

$$I_1 = U_{\text{рез}} b_1 \text{ и } I_2 = U_{\text{рез}} b_2,$$

где $U_{\text{рез}}$ — напряжение на контуре при резонансе токов.

На рис. 269 изображены графики изменения тока I в неразветвленном участке цепи и напряжения U на резонансном контуре при изменении частоты f колебаний в контуре.

Следовательно, радиотехнические контуры резко увеличивают свое сопротивление при резонансе токов. В соответствии с этим резко усиливается напряжение на контуре и значительно увеличиваются токи в параллельных ветвях, в то время как ток в неразветвленном участке цепи практически

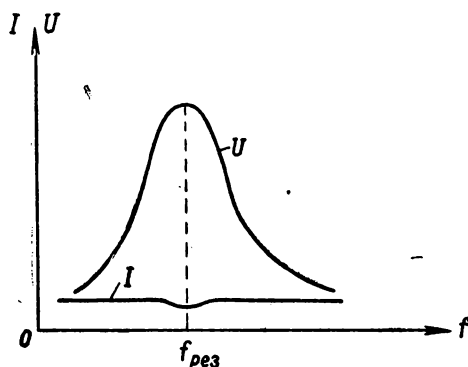


Рис. 269. Графики зависимости напряжения U на резонансном контуре и тока I в неразветвленном участке цепи от частоты f

сохраняет свое действующее значение неизменным. Резкое же увеличение мощности электромагнитных колебаний в резонансном контуре используется для усиления электромагнитных колебаний.

Резонанс токов важную роль играет и в силовоточной технике. Известно, что активная мощность в цепи переменного тока определяется по формуле

$$P_a = UI \cdot \cos \varphi,$$

где $\cos \varphi$ — коэффициент мощности.

Если данная мощность передается при $\cos \varphi = 1$, т. е. при $\varphi = 0$, то ток в цепи равен

$$I = \frac{P_a}{U}.$$

Если же мощность P_a передается, например, при $\cos \varphi = 0,5$, то ток в цепи равен

$$I = \frac{P}{U \cdot 0,5} = 2 \frac{P}{U},$$

т. е. он по сравнению с первым случаем увеличился в два раза.

Итак, чем меньше коэффициент мощности $\cos \varphi$, тем при всех прочих равных условиях больше ток в цепи, питающий приемники электрической энергии. С ростом же тока в цепи растут непроизводительные тепловые потери в ней. Помимо этого, чем меньше $\cos \varphi$ в цепи, тем большая доля тока приходится на его реактивную составляющую, обусловленную реактивной энергией, которой периодически обменивается генератор с потребителями.

При резонансе же токов генератор совершенно разгружается от реактивной составляющей тока, необходимой, например, для катушки индуктивности, так как он получается за счет реактивной энергии, которой обмениваются магнитное поле катушки и электрическое поле конденсатора.

На практике стремятся как можно больше увеличить $\cos \varphi$. Для этой цели к потребителям, требующим реактивного тока индуктивного характера, подключают параллельно необходимую емкость такой величины, чтобы она смогла своим реактивным током скомпенсировать реактивную составляющую тока в ветви с индуктивностью. Если по тем или иным причинам не удастся добиться полного резонанса токов, то все же этим способом можно значительно улучшить коэффициент мощности цепи.

ГЛАВА XXIV

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОМПЛЕКСНЫХ ЧИСЕЛ В ТЕОРИИ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ

§ 119. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Несложные задачи по переменному току можно решать с большой точностью методом проводимости. Но при решении сложных задач этот метод иррационален, так как требует слишком много времени на вычисления.

Графический метод решения задач прост, не требует много времени, но не всегда дает необходимую точность решений.

В теории переменных токов при решении сложных задач успешно применяется метод комплексных чисел.

Удобство этого метода заключается в том, что при нем геометрические действия над векторами заменяются алгебраическими действиями над комплексными числами, соответствующими этим векторам. Заменяя векторы напряжением, тока и т. д. комплексными числами, удастся решать задачи на сложные цепи по формулам, аналогичным тем, которые применяются при решении задач на сложные цепи постоянного тока.

В алгебре мы имеем дело с так называемыми относительными числами, т. е. с числами положительными и отрицательными. Всякое алгебраическое число характеризуется абсолютной величиной и знаком, например, температура воздуха $t_1^{\circ} = +10^{\circ} \text{C}$, $t_2^{\circ} = -5^{\circ} \text{C}$, ток $i_1 = +5 \text{ a}$, $i_2 = -3 \text{ a}$, напряжение $u_1 = +100 \text{ в}$, $u_2 = -60 \text{ в}$ и т. д.

Всякое алгебраическое число можно изобразить графически в виде отрезка прямой линии, отложенного в некотором масштабе на числовой оси от начальной точки в ту или иную сторону в зависимости от знака этого числа. На рис. 270 показана прямая линия (числовая ось), на которой отмечена начальная точка 0 (начало отсчета чисел). Вправо от этой точки 0 в некотором масштабе отложены положительные алгебраические числа, а влево — отрицательные. Изображая алгебраическое число направленным вдоль числовой оси отрезком прямой, мы ему в известной степени приписываем свойства вектора. Поэтому действия над алгебраическими числами можно заменить действиями над векторами, изображающими их.

На рис. 271 показан пример сложения двух алгебраических чисел графическим методом.

При сложении двух векторов, изображающих алгебраические числа, надо к концу первого слагаемого вектора приложить начало второго вектора, сохранив направление последнего неизменным. Сумма

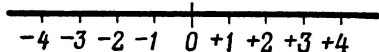


Рис. 270. Числовая ось относительных чисел

двух векторов определится величиной отрезка, имеющего начало в точке 0 и конец, совпадающий с концом второго слагаемого вектора.

Вычитание векторов есть действие, обратное их сложению. Вычесть из одного вектора другой — это значит к первому из них прибавить второй, но с обратным знаком (направлением). На рис. 272 показан пример вычитания двух алгебраических чисел графическим методом.

Числа арифметические и обычные алгебраические называются числами действительными, или вещественными, если они дают представление о реальном количестве единиц тех или иных величин, например 5 м, 3 сек., 2 а, просто число 8 и т. д.

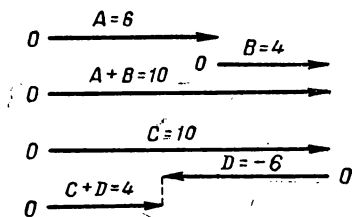


Рис. 271. Графический метод сложения двух алгебраических чисел

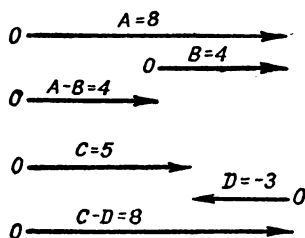


Рис. 272. Графический метод вычитания двух алгебраических чисел

§ 120. МНИМОЕ ЧИСЛО

Корень квадратный из любого числа есть такое число, которое, будучи помножено само на себя, должно дать произведение, равное подкоренному числу. Но, как известно, нет такого числа, которое было бы помножено само на себя и дало бы произведение с отрицательным знаком, а поэтому извлечь квадратный корень из отрицательного числа невозможно.

Преобразуем алгебраическое выражение $\sqrt{-9}$ следующим образом:

$$\sqrt{-9} = \sqrt{9(-1)} = 3\sqrt{-1}.$$

Алгебраическое выражение $\sqrt{-1}$ принято называть мнимой единицей и обозначать символом i или j . В дальнейшем будем пользоваться символом j , оставив символ i для обозначения мгновенного значения переменного тока.

Итак,

$$j = \sqrt{-1}, \quad (372)$$

Где j — мнимая единица.

Следовательно,

$$\sqrt{-9} = 3\sqrt{-1} = 3j,$$

т. е. выражение $\sqrt{-9}$ равно трем мнимым единицам.

Всякое число, состоящее из совокупности мнимых единиц, называется мнимым числом, например $2j$, nj и т. д., где n — вещественное число.

Мнимое число в отличие от вещественного не имеет физического смысла, и его надо рассматривать как подсобную математическую величину.

Мнимое число есть число алгебраическое, т. е. оно может быть положительным или отрицательным, например:

$$\sqrt{-25} = 5j \text{ и } -\sqrt{-16} = -4\sqrt{-1} = -4j.$$

Над мнимым числом можно производить алгебраические действия, например:

$$5j + 3j = 8j; \quad 5j - 3j = 2j; \quad 4j - (-1j) = 5j.$$

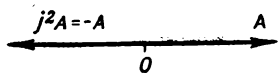


Рис. 273. Вектор, соответствующий данному числу, при умножении на j^2 поворачивается против часовой стрелки на 180° , не меняя своей абсолютной величины

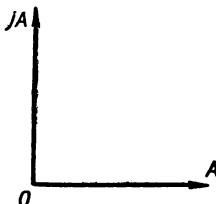


Рис. 274. Вектор, умноженный на j , поворачивается против часовой стрелки на 90°

Возведение в степень мнимой единицы приводит к следующим результатам:

$$j^2 = j j = \sqrt{-1} \cdot \sqrt{-1} = -1; \quad j^3 = j^2 j = -1 j = -j; \\ j^4 = j^3 j = -j j = -j^2 = +1; \quad j^5 = j^4 j = +1 j = j \text{ и т. д.}$$

При возведении в квадрат мнимой единицы получается вещественная отрицательная единица. Следовательно, при умножении вещественного (действительного) числа на j^2 мы меняем знак этого числа на обратный, например: $3j^2 = -3$; $-5j^2 = +5$ и т. д. Значит, вектор, соответствующий этому числу, при умножении его на j^2 поворачивается на 180° (рис. 273), не меняя своей абсолютной величины.

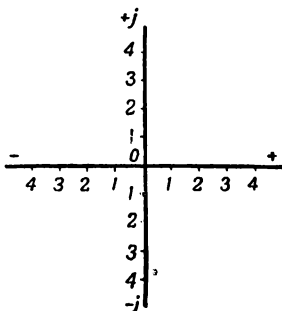


Рис. 275. Оси вещественных и мнимых величин в комплексной числовой плоскости

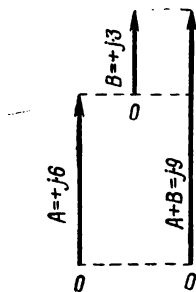


Рис. 276. Графический метод сложения мнимых чисел

Умножить вектор на j^2 — это значит повернуть его на 180° . В соответствии с этим условно принято считать, что при умножении вектора на j он поворачивается против движения часовой стрелки на 90° (рис. 274). При умножении вектора на j^2 он поворачивается против часовой стрелки на угол 180° , при умножении на j^3 — на угол 270° и т. д. При умножении вектора на $-j$ вектор поворачивается на угол -90° , что равносильно умножению вектора на $j^3 = -j$, т. е. повороту его против движения часовой стрелки на угол 270° .

Для того чтобы графически представить мнимые числа, их изображают в виде отрезков прямой (векторов), наносимых на ось мнимых чисел, которая, как это вытекает из предыдущих соображений, должна быть расположена перпендикулярно оси действительных величин (рис. 275).

Плоскость с нанесенными на ней осями действительных и мнимых чисел называется комплексной числовой плоскостью.

Над векторами, изображающими мнимые числа, можно совершать действия геометрического сложения и вычитания, как и над векторами, изображающими вещественные величины (рис. 276).

§ 121. КОМПЛЕКСНОЕ ЧИСЛО

Число, состоящее из действительных и мнимых единиц, называется комплексным числом, например:

$$3 + j \cdot 4; \quad a - jb,$$

где 3 и a — действительные числа;

4 и b — действительные числа, являющиеся коэффициентами при мнимой единице;

j — мнимая единица.

Комплексное число иногда сокращенно называется комплексом. Этим названием мы будем пользоваться в дальнейшем.

Всякому комплексу на комплексной числовой плоскости соответствует некоторый вектор. Рассмотрим это положение на конкретном примере.

Пусть требуется представить в виде вектора комплекс

$$Z = 3 + j \cdot 4,$$

где Z — комплексное число;

3 — действительное число;

$j \cdot 4$ — мнимое число.

Нанесем на ось действительных чисел заданное в комплексе действительное число 3 (рис. 277) и на ось мнимых чисел — мнимое число $j \cdot 4$. Оба эти числа в сумме дают заданный комплекс Z . Следовательно, если мы сложим геометрически векторы, соответствующие действительному числу 3 и мнимому числу $j \cdot 4$, то должны получить результирующий вектор Z , соответствующий заданному комплексу.

Численное значение комплекса называется его модулем.

Модуль комплекса легко определить геометрически.

Вектор, соответствующий данному комплексу, является геометрической суммой двух векторов слагаемых, расположенных под прямым углом друг к другу, а поэтому его можно определить по теореме Пифагора. Например, для комплекса $A = a + jb$ (рис. 278) его модуль $|A|$ определим по формуле

$$|A| = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (373)$$

т. е. модуль комплекса равен корню квадратному из суммы квадратов действительного числа комплекса и коэффициента при его мнимом числе.

Пример 145. Определить модули комплексов

$$A = 0,8 + j \cdot 0,6 \text{ и } B = -12 + (-j \cdot 9).$$

Решение. По формуле (373) находим

$$|A| = \sqrt{0,8^2 + 0,6^2} = 1,0;$$

$$|B| = \sqrt{12^2 + 9^2} = 15.$$

Угол α , составленный вектором A с положительной полуосью действительных величин, называется аргументом комплекса (рис. 278).

Положительные аргументы комплекса надо откладывать против движения часовой стрелки от положительной полуоси действительных чисел, а отрицательные аргументы — в направлении вращения часовой стрелки.

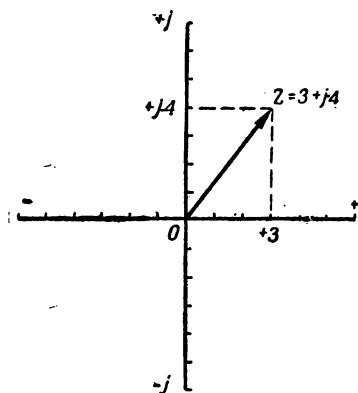


Рис. 277. Вектор, соответствующий комплексу $Z = 3 + j \cdot 4$

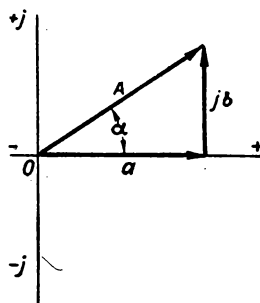


Рис. 278. Модуль комплекса $A = a + jb$ равен $|A| = \sqrt{a^2 + b^2}$

Аргумент α комплекса $A = a + jb$ (рис. 278) можно определить по тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{a},$$

где a — действительная часть комплекса;
 b — коэффициент при мнимой части комплекса;
 α — аргумент комплекса.

Пример 146. Определить модуль и аргумент комплекса $A = 8 + j \cdot 6$.
Решение. Модуль комплекса

$$|A| = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10.$$

Аргумент комплекса находим по тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{6}{8} = 0,75,$$

откуда по таблице для тангенсов находим, что

$$\alpha = 36^\circ 50'.$$

Пример 147. Определить модуль и аргумент комплекса

$$A = -3 - j \cdot 3.$$

Решение. Модуль комплекса

$$|A| = \sqrt{3^2 + 3^2} = 4,23.$$

Для определения аргумента надо вначале найти, где в комплексной плоскости будет расположен вектор, соответствующий комплексу A . Судя по действительной части комплекса (-3) и по коэффициенту при мнимой части его (-3), вектор A должен быть расположен в третьем квадранте, т. е. угол α лежит в пределах от 180 до 270° .

Аргумент определяем по тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{b}{a} = \frac{-3}{-3} = 1.$$

Этому тангенсу ($\operatorname{tg} \alpha = 1$) соответствуют два угла: $\varphi = 45^\circ$ и $\varphi = 180^\circ + 45^\circ = 225^\circ$.

Первый из них для нас не подходит по соображениям, высказанным выше, а поэтому принимаем $\varphi = 225^\circ$.

Выражение комплекса вида $A = a + jb$ называется алгебраической формой изображения его.

Если задан модуль и аргумент комплекса, то легко найти действительную и мнимую части комплекса и его алгебраическую форму. Из прямоугольного треугольника (см. рис. 278)

$$a = |A| \cdot \cos \alpha; \quad b = |A| \cdot \sin \alpha. \quad (374)$$

Следовательно, комплекс $A = a + jb$ можно представить в следующем виде:

$$A = a + jb = |A| \cdot \cos \alpha + j \cdot |A| \cdot \sin \alpha. \quad (375)$$

Форма комплекса, записанная формулой (375), называется тригонометрической формой изображения его.

Пример 148. Модуль комплекса $|A| = 12$ и аргумент его $\alpha = 20^\circ 30'$. Определить действительную и мнимую части комплекса и представить его в тригонометрической и алгебраической формах.

Решение. Тригонометрическая форма комплекса

$$A = 12 \cdot \cos 20^\circ 30' + j \cdot 12 \cdot \sin 20^\circ 30'.$$

Действительная часть комплекса

$$a = 12 \cdot \cos 20^\circ 30' = 12 \cdot 0,94 = 11,28.$$

Коэффициент при мнимой части комплекса

$$b = 12 \cdot \sin 20^\circ 30' = 12 \cdot 0,35 = 4,2.$$

Алгебраическая форма комплекса

$$A = 11,28 + j \cdot 4,2.$$

Помимо рассмотренных выше алгебраической и тригонометрической форм комплексных чисел, применяется еще показательная форма их.

Комплексное число в показательной форме выражается произведением модуля комплекса на множитель $e^{j\alpha}$:

$$A = |A| e^{j\alpha}, \quad (376)$$

где A — комплексное число;
 $|A|$ — модуль комплексного числа;
 α — аргумент комплекса;
 j — мнимая единица;
 $e=2,718$ — основание натуральных логарифмов.

Комплекс, выраженный в показательной форме, можно преобразовать в тригонометрическую форму:

$$A = |A| e^{j\alpha} = |A| \cdot \cos \alpha + j |A| \cdot \sin \alpha. \quad (377)$$

Если аргумент комплекса отрицателен, то

$$A = |A| e^{-j\alpha} = |A| \cdot \cos \alpha - j |A| \cdot \sin \alpha.$$

Пример 149. Задан комплекс $A = 20 e^{j \cdot 45^\circ}$.
 Требуется представить его в тригонометрической и алгебраической формах.

Решение. По формуле (377) находим

$$A = 20 e^{j \cdot 45^\circ} = 20 \cdot \cos 45^\circ + j \cdot 20 \cdot \sin 45^\circ = 14,14 + j \cdot 14,14.$$

Пример 150. Комплекс $A = 30 - j \cdot 40$ представить в показательной форме.
Решение. Модуль комплекса

$$|A| = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50,$$

а аргумент комплекса

$$\alpha = \arctg \frac{-40}{30} = \arctg (-1,333) = -53^\circ 10'.$$

Следовательно,

$$A = 30 - j \cdot 40 = 50 e^{-j \cdot 53^\circ 10'}.$$

Пример 151. Выразить комплекс $A = 20 e^{-j \frac{\pi}{2}}$ в тригонометрической и алгебраической формах.

$$A = 20 e^{-j \frac{\pi}{2}} = 20 \cdot \cos \frac{\pi}{2} - j \cdot 20 \cdot \sin \frac{\pi}{2} = -j \cdot 20.$$

§ 122. ДЕЙСТВИЯ НАД КОМПЛЕКСНЫМИ ЧИСЛАМИ

Комплексные числа — это числа алгебраические, а поэтому над ними можно производить все алгебраические действия.

Два комплексных числа равны друг другу, если их действительные и мнимые части порознь равны друг другу.

Если, например, $a = c$ и $b = d$, то $a + jb = c + jd$.

1. Сложение комплексов

При сложении комплексов надо сложить отдельно их действительные и мнимые части по правилу алгебраического сложения:

$$(a + jb) + (c + jd) = (a + c) + j(b + d). \quad (378)$$

Если комплексы изображены графически в комплексной плоскости при помощи векторов, то сумме комплексов будет соответствовать вектор, являющийся геометрической суммой векторов составляющих комплексов.

Пример 152. Найти сумму, модуль и аргумент комплексв

$$A = 4 + j \cdot 4 \text{ и } B = 5 \angle j \cdot 8.$$

Решение. Сумма комплексв

$$C = A + B = 4 + j \cdot 4 + 5 + j \cdot 8 = 9 + j \cdot 12; |C| = \sqrt{9^2 + 12^2} = 15.$$

Аргумент суммы комплексв находим по тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{12}{9} = 1,333,$$

откуда $\alpha = 53^\circ 10'$.

2. Вычитание комплексв

Вычьсть из одного комплексв другой — это значит к первому комплексу прибавить второй с обратным знаком:

$$(a + jb) - (c + jd) = (a + jb) + (-c - jd) = (a - c) + j(b - d), \quad (379)$$

т. е. при вычитании из одного комплексв другого надо из действительной части первого комплексв вычьсть действительную часть второго комплексв, и полученная разность будет действительной частью разности комплексв, а затем из мнимой части первого комплексв вычьсть мнимую часть второго комплексв, и полученная разность будет мнимой частью разности комплексв.

При вычитании векторов, соответствующих заданным комплексам, надо к вектору, изображающему комплекс-уменьшаемое, прибавить вектор комплексв-вычитаемого, но повернутый на 180° , и затем эти векторы сложить. Сумма этих векторов определит собой искомую разность комплексв.

Пример 153. Найти разность, модуль и аргумент комплексв

$$A = -6 + j \cdot 4 \text{ и } B = 2 + j \cdot 6.$$

Решение. Найдем разность комплексв в алгебраической форме:

$$C = A - B = (-6 + j \cdot 4) - (2 + j \cdot 6) = (-6 + j \cdot 4) + (-2 - j \cdot 6) = -8 - j \cdot 2.$$

Модуль разности комплексв

$$|C| = \sqrt{8^2 + 2^2} = 8,24.$$

Аргумент разности комплексв находим по тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{-2}{-8} = 0,25.$$

Судя по знакам действительной и мнимых частей комплексв, вектор находится в третьем квадранте, а поэтому угол

$$\varphi = 180^\circ + 14^\circ 10' = 194^\circ 10'.$$

3. Умножение комплексв

При умножении комплексв они перемножаются согласно правилам умножения алгебраических многочленов, т. е. при умножении одного комплексв на другой надо все члены первого комплексв поочередно помножить на все члены второго комплексв, а затем сделать приведение подобных членов:

$$\begin{aligned} C &= (a + jb)(c + jd) = ac + jad + jbc + j^2bd = ac + j(ad + bc) - bd = \\ &= (ac - bd) + j(ad + bc). \end{aligned} \quad (380)$$

Модуль произведения комплексов

$$|C| = \sqrt{(ac - bd)^2 + (ad + bc)^2}. \quad (381)$$

Аргумент произведения определяется по тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{ad + bc}{ac - bd}. \quad (382)$$

Пример 154. Определить произведение комплексов $A = 2 + j \cdot 4$ и $B = 3 - j \cdot 2$.

Решение. Находим произведение, перемножая комплексы по правилу умножения многочленов:

$$C = AB = (2 + j \cdot 4)(3 - j \cdot 2) = 6 - j \cdot 4 + j \cdot 12 - j^2 \cdot 8 = 6 + j \cdot 8 + 8 = 14 + j \cdot 8.$$

Модуль произведения комплексов

$$|C| = \sqrt{14^2 + 8^2} = 16,1.$$

Аргумент произведения комплексов находим по тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{8}{14} = 0,571,$$

откуда

$$\alpha = 29^\circ 50'.$$

Произведение двух комплексов, выраженных в показательной форме, есть комплекс, модуль которого равен произведению модулей сомножителей, а аргумент — алгебраической сумме аргументов перемножаемых комплексов:

$$C = AB = |A|e^{j\alpha} |B|e^{j\beta} = |A| \cdot |B| e^{j(\alpha+\beta)} = |C|e^{j\gamma}, \quad (383)$$

где

$$|C| = |A| \cdot |B| \text{ и } \gamma = \alpha + \beta.$$

Пример 155. Определить произведение комплексов

$$A = 25e^{j \cdot 60} \text{ и } B = 4e^{-j \cdot 30}.$$

Решение. По формуле (383) находим

$$C = |A| \cdot |B| e^{j(\alpha+\beta)} = 25 \cdot 4e^{j(60-30)} = 100e^{j \cdot 30},$$

или

$$C = 100 \cdot \cos 30^\circ + j \cdot 100 \cdot \sin 30^\circ = 86,6 + j \cdot 50.$$

Два комплекса называются сопряженными, если они различаются только знаками перед мнимыми частями; например, комплексы $A = a + jb$ и $B = a - jb$ сопряженные.

Перемножим эти комплексы, применяя обычные правила умножения:

$$C = AB = (a + jb)(a - jb) = a^2 - jab + jab - j^2b^2 = a^2 + b^2, \quad (384)$$

т. е. произведение двух сопряженных комплексов есть число действительное, равное сумме квадратов действительной части и коэффициента при мнимой части одного из комплексов.

Пример 156. Найти произведение сопряженных комплексов

$$A = 6 + j \cdot 8 \text{ и } B = 6 - j \cdot 8.$$

Решение. По формуле (384) находим

$$C = AB = (6 + j \cdot 8)(6 - j \cdot 8) = 6^2 + 8^2 = 100.$$

4. Деление комплексов

Если требуется разделить один комплекс (делимое) на другой (делитель), то поступают следующим образом.

Вначале освобождаются от мнимости в знаменателе (в делителе), умножая делимое и делитель на комплекс, являющийся сопряженным комплексом делителя; затем, производя соответствующие действия, приводят комплекс (частное) к наиболее простому виду.

Предположим, требуется разделить комплекс $A = a + jb$ на комплекс $B = c + jd$.

Запишем действие деления комплексов в виде алгебраической дроби:

$$C = \frac{A}{B} = \frac{a + jb}{c + jd}.$$

Освободимся от мнимости в знаменателе, умножив числитель и знаменатель дроби на комплекс, сопряженный с комплексом знаменателя, т. е.

$$C = \frac{(a + jb)(c - jd)}{(c + jd)(c - jd)} = \frac{ac - jad + jbc + bd}{c^2 + d^2} = \frac{ac + bd}{c^2 + d^2} + j \frac{bc - ad}{c^2 + d^2}.$$

Пример 157. Требуется разделить комплекс $A = 4 + j \cdot 8$ на комплекс $B = 5 + j \cdot 2$.

Решение. Представим частное от деления заданных комплексов в виде алгебраической дроби:

$$C = \frac{A}{B} = \frac{4 + j \cdot 8}{5 + j \cdot 2}.$$

Освободимся от мнимости в знаменателе, умножив числитель и знаменатель дроби на комплекс $5 - j \cdot 2$:

$$C = \frac{(4 + j \cdot 8)(5 - j \cdot 2)}{(5 + j \cdot 2)(5 - j \cdot 2)} = \frac{20 - j \cdot 8 + j \cdot 40 + 16}{5^2 + 2^2} = \frac{36 + j \cdot 32}{29} = 1,24 + j \cdot 1,1.$$

Частное от деления двух комплексов, выраженных в показательной форме, есть комплекс, модуль которого равен частному от деления модуля комплекса делимого на модуль комплекса делителя, а аргумент равен алгебраической разности аргументов делимого и делителя:

$$C = \frac{A}{B} = \frac{|A| e^{j\alpha}}{|B| e^{j\beta}} = \frac{|A|}{|B|} e^{j(\alpha - \beta)} = |C| e^{j\gamma}, \quad (385)$$

где

$$|C| = \frac{|A|}{|B|} \text{ и } \gamma = \alpha - \beta.$$

Пример 158. Требуется определить частное от деления двух комплексов:

$$A = 25e^{j \frac{\pi}{2}} \text{ и } B = 10e^{j \frac{\pi}{4}}.$$

Решение. По формуле (385) находим

$$C = \frac{A}{B} = \frac{25}{10} e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{4}\right)} = 2,5e^{j\frac{\pi}{4}} = 2,5 \cdot \cos 45^\circ + j \cdot 2,5 \cdot \sin 45^\circ = \\ = 1,76 + j \cdot 1,76.$$

5. Возведение в степень комплекса

При возведении в степень комплекса необходимо возвести в заданную степень его модуль, а аргумент помножить на показатель степени:

$$C = (|A| e^{j\alpha})^n = (|A|)^n e^{jn\alpha} = |C| e^{j\gamma}, \quad (386)$$

где

$$|C| = (|A|)^n \quad \text{и} \quad \gamma = n\alpha.$$

Пример 159. Требуется возвести в третью степень комплекс $A = 4 + j \cdot 3$. Решение. Изобразим комплекс A в показательной форме. Для этого определим модуль и аргумент комплекса.

Модуль комплекса

$$|A| = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5.$$

Аргумент комплекса найдем по тангенсу: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{3}{4} = 0,75$, откуда $\alpha = 36^\circ 50'$.

Определяем искомый комплекс:

$$C = A^3 = (5e^{j \cdot 36^\circ 50'})^3 = 125e^{j \cdot 110^\circ 30'}.$$

6. Извлечение корня из комплекса

При извлечении корня из комплекса необходимо извлечь корень данной степени из модуля комплекса, а аргумент комплекса разделить на показатель корня:

$$C = \sqrt[n]{|A| e^{j\alpha}} = \sqrt[n]{|A|} e^{j\frac{\alpha}{n}} = |C| e^{j\gamma}, \quad (387)$$

где

$$|C| = \sqrt[n]{|A|} \quad \text{и} \quad \gamma = \frac{\alpha}{n}.$$

Пример 160. Требуется извлечь корень квадратный из комплекса

$$A = 9 + j \cdot 12.$$

Решение. Изобразим комплекс A в показательной форме. Для этого определим модуль и аргумент комплекса.

Модуль комплекса

$$|A| = \sqrt{9^2 + 12^2} = 15.$$

Аргумент комплекса находим по тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{12}{9} = 1,333, \quad \text{откуда} \quad \alpha = 53^\circ 10'.$$

Определяем искомый комплекс:

$$C = \sqrt{A} = \sqrt{15} e^{\frac{j \cdot 53^\circ 10'}{2}} = 3,873 e^{j \cdot 26^\circ 35'}.$$

§ 123. КОМПЛЕКСЫ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Допустим, что задан синусоидальный переменный ток, мгновенное значение которого определяется выражением

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi).$$

Построим для этого тока векторную диаграмму в комплексной плоскости так, чтобы начальная ось диаграммы совпала с осью положительных вещественных величин. Вектор амплитуды тока I_m отложим под углом $\omega t + \psi$ к начальной оси, или, иначе, оси вещественных положительных величин, в сторону против вращения часовой стрелки (рис. 279).

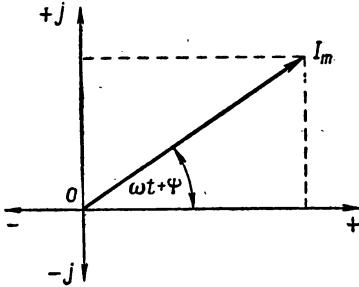


Рис. 279. Вектор тока I_m в комплексной плоскости

Так как каждому вектору в комплексной плоскости соответствует некоторое комплексное число, то и вектору тока I_m соответствует некоторый комплекс. Модулем этого комплекса является численное значение вектора I_m , а аргументом — угол $\omega t + \psi$. В соответствии с этим комплекс, соответствующий вектору I_m , можно записать в показательной форме так:

$$I_m e^{j(\omega t + \psi)}.$$

Представим теперь этот комплекс тока в тригонометрической форме:

$$I_m e^{j(\omega t + \psi)} = I_m \cdot \cos(\omega t + \psi) + j I_m \cdot \sin(\omega t + \psi). \quad (388)$$

Нетрудно видеть, что выражение, стоящее при мнимой единице (j), есть выражение мгновенного значения заданного синусоидального переменного тока. Это и понятно, так как мгновенное значение синусоидального тока на векторной диаграмме определяется как проекция вектора I_m на вертикальную ось, перпендикулярную начальной оси, или в данном случае как проекция на ось положительных мнимых величин. В соответствии с этим условились комплекс мгновенного значения синусоидального переменного тока $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi)$ представлять выражением

$$i(t) = I_m e^{j(\omega t + \psi)}, \quad (389)$$

где $i(t)$ — условное обозначение комплекса мгновенного значения синусоидального переменного тока;

I_m — модуль комплекса;

$(\omega t + \psi)$ — аргумент комплекса.

Но если от комплекса мгновенного значения синусоидального тока необходимо перейти к обычному выражению синусоидального тока, т. е. к выражению реального тока $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi)$, необходимо представить комплекс мгновенного значения тока в тригонометрической

форме и из него взять выражение при мнимой единице, которое и будет выражением мгновенного значения реального тока.

Пример 161. Комплекс мгновенного значения синусоидального переменного тока равен $i(t) = 15 \cdot e^{j\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)}$. Определить выражение для мгновенного значения тока.

Решение. Выразим заданный комплекс тока в тригонометрической форме

$$i(t) = 15 \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) + j \cdot 15 \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right).$$

Коэффициент, стоящий при мнимой части комплекса, и есть выражение мгновенного значения реального тока, т. е.

$$i = 15 \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right).$$

Пример 162. Мгновенное значение тока определяется выражением $i = 5 \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)$. Требуется найти комплекс мгновенного значения этого тока.

Решение. Преобразуем выражение для заданного мгновенного значения тока, заменив в нем косинус синусом соответствующего угла:

$$i = 5 \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) = 5 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right).$$

В соответствии с этим комплекс мгновенного значения заданного тока будет иметь следующий вид:

$$i(t) = 5e^{j\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right)},$$

или в тригонометрической форме

$$i(t) = 5 \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) + j \cdot 5 \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right).$$

Преобразуем выражение для комплекса мгновенного значения синусоидального переменного тока

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi),$$

представив его в следующем виде:

$$i(t) = I_m e^{j(\omega t + \psi)} = I_m e^{j\psi} e^{j\omega t}. \quad (390)$$

Множитель $e^{j\psi}$ показывает, что данный ток синусоидальный, так как

$$e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \cdot \sin \omega t.$$

Выражение, стоящее при мнимой единице этого комплекса, есть $\sin \omega t$.

Выражение $I_m e^{j\psi}$, стоящее в качестве сомножителя при $e^{j\omega t}$ в комплексе мгновенного значения синусоидального тока, называется комплексной амплитудой:

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi}, \quad (391)$$

где \dot{I}_m — условное обозначение комплексной амплитуды тока;
 I_m — модуль комплексной амплитуды тока (максимальное значение синусоидальной величины);
 ψ — аргумент комплексной амплитуды тока (начальная фаза синусоидального тока).

Чтобы показать, что рассматриваемый ток синусоидальный, над символом \dot{I}_m поставлена точка. Это правило — ставить точки над буквами, изображающими комплексы, — распространяется на все синусоидальные величины, например синусоидальные напряжения, электродвижущие силы и т. д.

Разделив левую и правую части комплексной амплитуды на $\sqrt{2}$, получим комплекс действующего значения синусоидального переменного тока:

$$\frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi},$$

или

$$\dot{I} = I e^{j\psi}, \quad (392)$$

где \dot{I} — комплекс действующего значения синусоидального переменного тока;
 I — модуль комплекса действующего значения синусоидального тока;
 ψ — аргумент комплекса действующего значения тока.

Пример 163. Задан комплекс действующего значения синусоидального переменного тока $\dot{I} = 10e^{j \cdot 30^\circ}$. Требуется определить действующее значение тока, начальную фазу его, комплексную амплитуду тока, комплекс его мгновенного значения и мгновенное значение тока.

Решение. Действующее значение тока равно модулю комплекса заданного тока $I = 10e^{j \cdot 30^\circ}$, т. е.

$$I = 10 \text{ а.}$$

Начальная фаза равна аргументу тока, т. е.

$$\psi = 30^\circ.$$

Комплексная амплитуда тока

$$\dot{I}_m = \sqrt{2} I e^{j \cdot 30^\circ} = \sqrt{2} \cdot 10 e^{j \cdot 30^\circ} = 14,1 e^{j \cdot 30^\circ}.$$

Комплекс мгновенного значения тока

$$\dot{I}_m e^{j\psi} e^{j\omega t} = 14,1 e^{j \cdot 30^\circ} e^{j\omega t} = 14,1 e^{j(\omega t + 30^\circ)}.$$

Мгновенное значение тока

$$i = 14,1 \cdot \sin(\omega t + 30^\circ).$$

Аналогично для переменного синусоидального напряжения можно написать комплексы мгновенного значения, действующего значения и комплексную амплитуду. Например, если $u = U_m \cdot \sin(\omega t - \psi_1)$, то:

комплекс мгновенного значения напряжения

$$u(t) = U_m e^{j(\omega t - \psi_1)};$$

комплекс действующего значения напряжения

$$\dot{U} = U e^{-j\psi_1};$$

комплексная амплитуда напряжения

$$\dot{U}_m = U_m e^{-j\psi_1}.$$

§ 124. СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В КОМПЛЕКСНОЙ ФОРМЕ

А) Вначале определим комплекс полного сопротивления цепи с последовательно соединенными активным r и индуктивным ωL сопротивлениями.

Допустим, что к рассматриваемой цепи приложено синусоидальное напряжение

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi).$$

В соответствии с этим мгновенное значение тока в этой цепи будет равно

$$i = \frac{U_m}{Z} \cdot \sin(\omega t + \psi - \varphi),$$

где $Z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}$ — полное сопротивление цепи;
 φ — угол сдвига фаз тока и напряжения, определяемый по его тангенсу $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{r}$.

Выразим действующие значения заданных напряжения и тока в комплексной форме:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= U e^{j\psi} \text{ — комплекс действующего значения напряжения;} \\ \dot{I} &= I e^{j(\psi - \varphi)} \text{ — комплекс действующего значения тока.} \end{aligned}$$

Если разделим комплекс действующего значения напряжения \dot{U} на комплекс действующего значения тока \dot{I} , то получим комплекс полного сопротивления цепи

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U e^{j\psi}}{I e^{j(\psi - \varphi)}} = \frac{U}{I} e^{j\varphi} = z e^{j\varphi}, \quad (393)$$

где Z — комплекс полного сопротивления цепи;
 z — модуль комплекса полного сопротивления цепи, равный $z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}$;
 φ — аргумент комплекса полного сопротивления цепи, равный углу сдвига фаз тока и напряжения.

Выразим комплекс полного сопротивления цепи в тригонометрической, а затем в алгебраической форме:

$$Z = z e^{j\varphi} = z \cdot \cos \varphi + jz \cdot \sin \varphi. \quad (394)$$

Но, как известно, $z \cdot \cos \varphi = r$ — активное сопротивление цепи, а $z \cdot \sin \varphi = \omega L$ — реактивное (индуктивное) сопротивление цепи; поэтому

$$Z = z e^{j\varphi} = z \cdot \cos \varphi + jz \cdot \sin \varphi = r + j\omega L. \quad (395)$$

Следовательно, вещественная часть комплекса полного сопротивления цепи изображает здесь активное сопротивление цепи, а мнимая часть — реактивное.

Перед мнимой частью комплекса полного сопротивления цепи с индуктивным характером нагрузки стоит знак положительный.

Пример 164. Требуется выразить в комплексной форме полное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных активного сопротивления $r = 8$ ом и индуктивности $L = 0,0012$ гн, если угловая частота синусоидального напряжения, приложенного к цепи, равна $\omega = 5000 \frac{1}{\text{сек}}$.

Решение. Индуктивное сопротивление

$$x_L = \omega L = 5000 \cdot 0,0012 = 6 \text{ ом.}$$

Комплекс полного сопротивления цепи в алгебраической форме равен

$$Z = r + j\omega L = 8 + j \cdot 6.$$

Модуль комплекса полного сопротивления цепи

$$z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10 \text{ ом.}$$

Аргумент комплекса полного сопротивления цепи найдем по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{r} = \frac{6}{8} = 0,75,$$

откуда $\varphi = 36^\circ 50'$.

Комплекс полного сопротивления цепи в тригонометрической форме будет иметь следующий вид:

$$Z = z \cdot \cos \varphi + jz \cdot \sin \varphi = 10 \cdot \cos 36^\circ 50' + j \cdot 10 \cdot \sin 36^\circ 50'.$$

Комплекс полного сопротивления в показательной форме будет иметь следующий вид:

$$Z = ze^{j\varphi} = 10e^{j \cdot 36^\circ 50'}.$$

Б) Теперь определим комплекс полного сопротивления для цепи с последовательно соединенными активным r и емкостным $\frac{1}{\omega C}$ сопротивлениями.

Допустим, что к рассматриваемой цепи приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi)$.

В соответствии с этим мгновенное значение тока в цепи

$$i = \frac{U_m}{Z} \cdot \sin(\omega t + \psi + \varphi),$$

где $Z = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ — полное сопротивление цепи;

φ — угол сдвига фаз тока и напряжения (ток опережает напряжение по фазе на угол φ).

Выразим действующие значения заданных напряжения и тока в комплексной форме:

$\dot{U} = Ue^{j\psi}$ — комплекс действующего значения напряжения;

$\dot{i} = Ie^{j(\psi+\varphi)}$ — комплекс действующего значения тока.

Если разделим комплекс действующего значения напряжения \dot{U} на комплекс действующего значения тока \dot{i} , то получим комплекс полного сопротивления цепи

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{i}} = \frac{Ue^{j\psi}}{Ie^{j(\psi+\varphi)}} = \frac{U}{I} e^{-j\varphi} = ze^{-j\varphi}, \quad (396)$$

где $z = \frac{U}{I}$ — модуль комплекса полного сопротивления, равный $z =$

$$= \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2};$$

φ — аргумент комплекса полного сопротивления цепи, равный углу сдвига фаз тока и напряжения; φ можно определить по его тан-

$$\text{генсу } \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega C r}.$$

Выразим комплекс полного сопротивления цепи в тригонометрической, а затем в алгебраической форме:

$$Z = ze^{-j\varphi} = z \cdot \cos \varphi - jz \cdot \sin \varphi. \quad (397)$$

Но, как известно, $z \cdot \cos \varphi = r$ — активное сопротивление цепи и $z \cdot \sin \varphi = \frac{1}{\omega C}$ — реактивное (емкостное) сопротивление цепи; поэтому

$$Z = ze^{-j\varphi} = z \cdot \cos \varphi - jz \cdot \sin \varphi = r - j \frac{1}{\omega C}. \quad (398)$$

Следовательно, вещественная часть комплекса полного сопротивления изображает здесь активное сопротивление цепи, а мнимая часть — реактивное (емкостное).

Перед мнимой частью комплекса полного сопротивления цепи с емкостным характером нагрузки стоит знак отрицательный.

Пример 165. Требуется выразить в комплексной форме полное сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных активного сопротивления $r = 60$ ом и емкостного сопротивления $x_C = \frac{1}{\omega C} = 40$ ом.

Решение. Комплекс полного сопротивления в алгебраической форме равен

$$Z = r - j \frac{1}{\omega C} = 60 - j \cdot 40.$$

Модуль комплекса полного сопротивления цепи равен

$$z = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{60^2 + 40^2} = 72,2 \text{ ом.}$$

Аргумент комплекса полного сопротивления цепи найдем по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\omega C r} = \frac{-40}{60} = -0,666,$$

откуда $\varphi = -33^\circ 40'$.

Комплекс полного сопротивления в тригонометрической форме будет иметь следующий вид:

$$Z = z \cdot \cos \varphi - jz \cdot \sin \varphi = 72,2 \cdot \cos 33^\circ 40' - j \cdot 72,2 \cdot \sin \varphi.$$

И, наконец, комплекс полного сопротивления в показательной форме будет иметь вид

$$Z = ze^{-j\varphi} = 72,2e^{-j \cdot 33^\circ 40'}.$$

В) Для цепи, состоящей из последовательно соединенных активного r , индуктивного ωL и емкостного $\frac{1}{\omega C}$ сопротивлений, комплекс полного сопротивления цепи в алгебраической форме изобразится следующим образом:

$$Z = r + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right),$$

где r — вещественная часть комплекса (активное сопротивление цепи); $j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$ — мнимая часть комплекса, соответствующая полному реактивному сопротивлению цепи.

Модуль комплекса численно равен полному сопротивлению заданной цепи:

$$z = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Аргумент комплекса полного сопротивления цепи найдем по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r},$$

откуда по тригонометрическим таблицам находим аргумент φ .

Если $\omega L > \frac{1}{\omega C}$, то $\varphi > 0$ и перед мнимой частью комплекса надо поставить знак положительный; если же, наоборот, $\omega L < \frac{1}{\omega C}$, то $\varphi < 0$ и перед мнимой частью комплекса надо поставить знак отрицательный.

Следовательно, если $\omega L > \frac{1}{\omega C}$, то

$$Z = r + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = z e^{j\varphi} = z \cdot \cos \varphi + j z \cdot \sin \varphi,$$

а если $\omega L < \frac{1}{\omega C}$, то

$$Z = r - j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = z e^{-j\varphi} = z \cdot \cos \varphi - j z \cdot \sin \varphi.$$

§ 125. ПРОВОДИМОСТИ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В КОМПЛЕКСНОЙ ФОРМЕ

Комплекс полной проводимости цепи — это величина, обратная комплексу полного сопротивления цепи.

А) Для цепи с активно-индуктивным характером нагрузки

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{r + j\omega L}, \quad (399)$$

где Y — комплекс полной проводимости цепи;
 Z — комплекс полного сопротивления цепи.

Преобразуем равенство (399), умножив числитель и знаменатель его на комплекс, сопряженный с комплексом полного сопротивления. Это даст нам возможность освободиться от мнимости в знаменателе:

$$Y = \frac{r - j\omega L}{(r + j\omega L)(r - j\omega L)} = \frac{r - j\omega L}{r^2 + (\omega L)^2} = \frac{r}{r^2 + (\omega L)^2} - j \frac{\omega L}{r^2 + (\omega L)^2} = g - jb, \quad (400)$$

где $g = \frac{r}{r^2 + (\omega L)^2}$ — активная проводимость цепи;

$b = \frac{\omega L}{r^2 + (\omega L)^2}$ — реактивная проводимость цепи.

Следовательно, вещественная часть комплекса полной проводимости цепи является активной проводимостью, а мнимая — реактивной.

Перед мнимой частью комплекса полной проводимости цепи с активно-индуктивной нагрузкой стоит знак отрицательный.

Модуль комплекса (400) равен

$$y = |Y| = \sqrt{g^2 + b^2},$$

а аргумент комплекса находится по тангенсу этого угла

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g}.$$

В показательной и тригонометрической формах комплекс полной проводимости для цепи с активно-индуктивным характером нагрузки имеет следующий вид:

$$Y = g - jb = ye^{-j\varphi} = y \cdot \cos \varphi - jy \cdot \sin \varphi,$$

где $y = |Y|$ — модуль комплекса.

Б) Для цепи с активно-емкостным характером нагрузки

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{r - j \frac{1}{\omega C}}, \quad (401)$$

где Y — комплекс полной проводимости цепи;

Z — комплекс полного сопротивления цепи.

Преобразуем равенство (401), умножив числитель и знаменатель его на комплекс, сопряженный с комплексом полного сопротивления цепи:

$$Y = \frac{r + j \frac{1}{\omega C}}{\left(r - j \frac{1}{\omega C}\right) \left(r + j \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{r + j \frac{1}{\omega C}}{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = \frac{r}{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} + j \frac{\frac{1}{\omega C}}{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = g + jb,$$

где $g = \frac{r}{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ — активная проводимость цепи;

$b = \frac{\frac{1}{\omega C}}{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$ — реактивная проводимость цепи.

Перед мнимой частью комплексса полной проводимости цепи с активно-емкостной нагрузкой стоит знак положительный.

В показательной и тригонометрической формах комплекс полной проводимости для рассматриваемого случая будет иметь следующий вид:

$$Y = g + jb = ye^{+j\varphi} = y \cdot \cos \varphi + jy \cdot \sin \varphi,$$

где $y = |Y| = \sqrt{g^2 + b^2}$ — модуль комплекса полной проводимости;
 φ — аргумент комплекса, определяемый по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{\frac{\omega C}{r}}.$$

В) Если задана цепь с последовательно соединенными активным r , индуктивным ωL и емкостным $\frac{1}{\omega C}$ сопротивлениями, то выражение комплекса полной проводимости этой цепи будет находиться в зависимости от соотношений индуктивного и емкостного сопротивлений этой цепи.

Для случая, когда $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ или $X = \omega L - \frac{1}{\omega C} > 0$ и $\varphi > 0$,

$$Y = g - jb = ye^{-j\varphi} = y \cdot \cos \varphi - jy \cdot \sin \varphi.$$

Для случая, когда $\omega L < \frac{1}{\omega C}$ или $X = \omega L - \frac{1}{\omega C} < 0$ и $\varphi < 0$,

$$Y = g + jb = ye^{j\varphi} = y \cdot \cos \varphi + jy \cdot \sin \varphi,$$

где $y = |Y| = \sqrt{y^2 + b^2}$,

$$g = \frac{r}{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad \text{и} \quad b = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

и угол φ находится по тангенсу его

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r}.$$

§ 126. МОЩНОСТЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА В КОМПЛЕКСНОЙ ФОРМЕ

Для того чтобы определить мощность электрического тока в комплексной форме, необходимо комплекс напряжения помножить на комплекс, сопряженный с комплексом тока:

$$P_i = \dot{U} \dot{I}^* \quad (402)$$

где P_i — комплекс полной (кажущейся) мощности;

\dot{U} — комплекс полного напряжения, приложенного к цепи;

\dot{I}^* — комплекс, сопряженный с комплексом тока \dot{I} .

Предположим, что

$$\dot{U} = U' + jU'' \quad \text{и} \quad \dot{I} = I' + jI'',$$

где \dot{U} — комплекс напряжения;

U' — действительная часть комплекса \dot{U} ;

U'' — коэффициент при мнимой части комплекса \dot{U} ;

\dot{I} — комплекс тока;

I' — действительная часть комплекса тока \dot{I} ;

I'' — коэффициент при мнимой части комплекса тока \dot{I} .

Сопряженный комплекс тока в данном случае принимает вид

$$\dot{I}^* = I' - jI'',$$

следовательно, мощность согласно формуле (402) будет определяться следующим выражением:

$$P_i = \dot{U}\dot{I}^* = (U' + jU'')(I' - jI'') = U'I' - jU'I'' + jU''I' + U''I'',$$

или

$$P_i = (U'I' + U''I'') + j(U''I' - U'I''), \quad (403)$$

или, иначе,

$$P_i = P_a + jP_r, \quad (404)$$

где

$$P_a = U'I' + U''I'', \quad (405)$$

$$P_r = U''I' - U'I'', \quad (406)$$

P_a — активная мощность, развиваемая током в цепи;

P_r — реактивная мощность, развиваемая током в цепи.

В формуле (403) перед мнимой частью комплекса будет знак плюс при индуктивном характере нагрузки и минус при емкостном характере.

Мощность в комплексной форме можно также получить, умножив комплекс тока на комплекс, сопряженный с комплексом напряжения:

$$P_i = \dot{U}\dot{I}^*. \quad (407)$$

В этом случае мы получим тот же результат, что и по формуле (404), только с той разницей, что знак перед мнимой частью комплекса изменится на обратный.

Пример 166. Определить мощность тока в цепи, если

$$\dot{U} = 80 + j \cdot 100 \text{ и } \dot{I} = 4 + j \cdot 3.$$

Решение. По формуле (402) находим

$$P_i = \dot{U}\dot{I}^* = (80 + j \cdot 100)(4 - j \cdot 3) = 320 - j \cdot 240 + j \cdot 400 + 300 = 620 + j \cdot 160,$$

или, иначе,

$$P_i = P_a + jP_r = 620 + j \cdot 160,$$

откуда

$$P_a = 620 \text{ вт и } P_r = 160 \text{ ва.}$$

Знак плюс у реактивной мощности показывает, что режим в цепи носит индуктивный характер.

Полная (кажущаяся) мощность равна модулю комплекса:

$$P_i = \sqrt{P_a^2 + P_r^2} = \sqrt{620^2 + 160^2} = 640 \text{ ва.}$$

§ 127. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В КОМПЛЕКСНОЙ ФОРМЕ

I. Закон Ома в комплексной форме выражается для участка цепи следующей формулой:

$$i = \frac{\dot{U}}{Z}, \quad (408)$$

где \dot{i} — комплекс действующего значения тока;
 \dot{U} — комплекс действующего значения напряжения,
 Z — комплекс полного сопротивления цепи.

Пример 167. К цепи, состоящей из последовательно соединенных активного сопротивления $r = 40$ ом и индуктивного сопротивления $x_L = \omega L = 30$ ом, приложено синусоидальное напряжение; комплекс действующего значения его равен $\dot{U} = 40 + j \cdot 80$. Требуется определить комплекс тока, модуль комплекса и его аргумент.

Решение. Выразим полное сопротивление цепи в комплексной форме:

$$Z = r + j\omega L = 40 + j \cdot 30.$$

Согласно формуле закона Ома

$$\begin{aligned} \dot{i} = \frac{\dot{U}}{Z} &= \frac{40 + j \cdot 80}{40 + j \cdot 30} = \frac{(40 + j \cdot 80)(40 - j \cdot 30)}{40^2 + 30^2} = \\ &= \frac{1600 + j \cdot 3200 - j \cdot 1200 + 2400}{2500} = (1,6 + j \cdot 0,8) \text{ а.} \end{aligned}$$

Модуль комплекса тока \dot{I} равен

$$I = \sqrt{1,6^2 + 0,8^2} = 1,79 \text{ а.}$$

Аргумент комплекса тока \dot{I} найдем по его тангенсу:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{0,8}{1,6} = 0,5, \text{ откуда } \psi = 26^\circ 32',$$

и тогда

$$\dot{i} = 1,79e^{j \cdot 26^\circ 32'}.$$

Пример 168. Определить комплекс напряжения, приложенного к цепи, комплекс сопротивления которой равен $Z = (45 - j \cdot 20)$ ом, а комплекс тока $\dot{i} = 3 e^{j \cdot 64^\circ}$.

Решение. Представим комплекс сопротивления цепи в показательной форме.

Модуль сопротивления равен

$$z = \sqrt{45^2 + 20^2} = 49,2 \text{ ом.}$$

Аргумент комплекса сопротивления найдем по его тангенсу

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{20}{45} = -0,445 \text{ и } \varphi = -24^\circ.$$

Следовательно,

$$z = 49,2e^{-j \cdot 24^\circ}.$$

Теперь определим комплекс напряжения

$$\dot{U} = iZ = 3e^{j \cdot 64^\circ} \cdot 49,2e^{-j \cdot 24^\circ} = 147,6e^{j \cdot 40^\circ} = (104,5 + 93,5) \text{ в.}$$

II. Первый закон Кирхгофа в комплексной форме формулируется следующим образом: алгебраическая сумма комплексных токов для любой узловой точки цепи переменного тока равна нулю:

$$\sum i_k = 0. \quad (409)$$

В формуле (409) токи необходимо брать с положительными знаками, если положительное направление их обращено к данной узловой точке, и, наоборот, с отрицательными знаками, если положительное направление их обра-

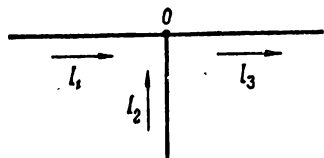


Рис. 280. Стрелки указывают положительные направления токов

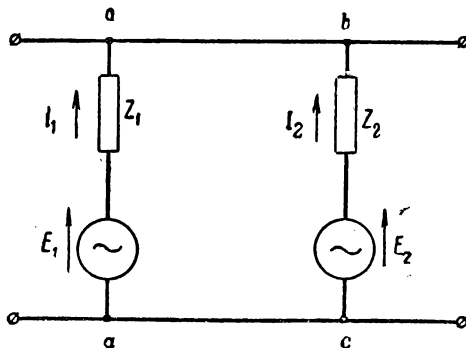


Рис. 281. Контур $abcd$ сложной цепи переменного тока

щено от узловой точки. Например, для узловой точки O некоторой сложной схемы (рис. 280) уравнение согласно первому закону Кирхгофа напишем так:

$$\sum i_k = i_1 + i_2 - i_3 = 0.$$

Пример 169. Определить ток i_3 в схеме рис. 280, если $i_1 = (6 + j \cdot 12) \text{ а}$ и $i_2 = (2 + j \cdot 3) \text{ а}$.

Решение. Согласно первому закону Кирхгофа

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0,$$

или

$$i_3 = i_1 + i_2 = (6 + j \cdot 12) + (2 + j \cdot 3) = 8 + j \cdot 15 = 17e^{j \cdot 62^\circ}.$$

III. Второй закон Кирхгофа в комплексной форме формулируется следующим образом: алгебраическая сумма комплексных электродвижущих сил, имеющих в замкнутом контуре, равняется алгебраической сумме комплексных падений напряжений на всех участках этого контура:

$$\sum \dot{E} = \sum iZ. \quad (410)$$

На рис. 281 приведен замкнутый контур $abcd$, выделенный из некоторой сложной цепи переменного тока. Положительные направления электродвижущих сил и токов в контуре обозначены стрелками. Уравнение второго закона Кирхгофа для такого контура имеет вид

$$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 = i_1 Z_1 - i_2 Z_2.$$

Применяя законы Кирхгофа в комплексной форме, можно рассчитать сложные цепи переменного тока, что и будет показано в одном из следующих примеров.

IV. Комплексный метод дает возможность при расчете параллельных цепей переменного тока применять расчетные формулы, аналогичные формулам, применяемым при расчете параллельных цепей постоянного тока.

Эквивалентное сопротивление нескольких параллельных ветвей в комплексной форме можно определить по формуле

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3},$$

где Z — эквивалентное сопротивление в комплексной форме;
 Z_1, Z_2 и т. д. — комплексы полных сопротивлений параллельных ветвей.

В частном случае, когда параллельная цепь состоит из двух ветвей,

$$Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2},$$

т. е. комплекс полного сопротивления двух параллельных ветвей равняется частному от деления произведения комплексов полного сопротивления этих ветвей на сумму комплексов этих сопротивлений.

§ 128. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ПОМОЩИ КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА

Пример 170. Две параллельно соединенные катушки обладают сопротивлениями $Z_1 = 5 + j \cdot 8$ и $Z_2 = 4 + j \cdot 4$. Определить общий ток в цепи, если напряжение, приложенное к ней, $\dot{U} = 120 + j \cdot 0$.

Решение. Полное комплексное сопротивление цепи

$$\begin{aligned} Z &= \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(5 + j \cdot 8)(4 + j \cdot 4)}{5 + j \cdot 8 + 4 + j \cdot 4} = \frac{20 + j \cdot 20 + j \cdot 32 - 32}{9 + j \cdot 12} = \\ &= \frac{(-12 + j \cdot 52)(9 - j \cdot 12)}{(9 + j \cdot 12)(9 - j \cdot 12)} = \frac{-108 + j \cdot 144 + j \cdot 468 + 624}{9^2 + 12^2} = \\ &= \frac{516 + j \cdot 612}{225} = 2,3 + j \cdot 2,72. \end{aligned}$$

Комплекс тока

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{120}{2,3 + j \cdot 2,72} = \frac{120(2,3 - j \cdot 2,72)}{2,3^2 + 2,72^2} = \frac{276 - j \cdot 326,4}{12,7} = 21,4 - j \cdot 25,7.$$

Модуль тока

$$I = \sqrt{21,4^2 + 25,7^2} = 33,5 \text{ а.}$$

Сдвиг фаз между током и напряжением найдем по тангенсу:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2,72}{2,3} = 1,18,$$

откуда по таблице тангенсов

$$\varphi = 49^\circ 50'.$$

Пример 171. Определить токи во всех участках сложной цепи (рис. 282), если $Z_1 = 10 - j \cdot 15$; $Z_2 = 2 + j \cdot 6$ и $Z_3 = 3,33 + j \cdot 2$ и приложенное к цепи напряжение $\dot{U} = 120 + j \cdot 0$.

Решение. Определим эквивалентное сопротивление двух параллельных ветвей:

$$Z_{1,2} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(10 - j \cdot 15)(2 + j \cdot 6)}{10 - j \cdot 15 + 2 + j \cdot 6} = \frac{20 + j \cdot 60 - j \cdot 30 + 90}{12 - j \cdot 9} = \\ = \frac{110 + j \cdot 30}{12 - j \cdot 9}.$$

Освободимся от мнимости в знаменателе:

$$Z_{1,2} = \frac{(110 + j \cdot 30)(12 + j \cdot 9)}{12^2 + 9^2} = \frac{1320 + j \cdot 990 + j \cdot 360 - 270}{225} = \\ = \frac{1050 + j \cdot 1350}{225} = 4,67 + j \cdot 6.$$

Полное сопротивление цепи

$$Z_{1,2,3} = Z_{1,2} + Z_3 = 4,67 + j \cdot 6 + 3,33 + j \cdot 2 = 8 + j \cdot 8.$$

Комплекс тока

$$\dot{i}_0 = \frac{\dot{U}}{Z_{1,2,3}} = \frac{120}{8 + j \cdot 8} = \frac{120(8 - j \cdot 8)}{8^2 + 8^2} = 7,5 - j \cdot 7,5.$$

Модуль тока

$$I_0 = \sqrt{7,5^2 + 7,5^2} = 10,6 \text{ а.}$$

Комплекс падения напряжения в сопротивлении Z_3

$$\dot{U}_3 = \dot{i}_0 Z_3 = (7,5 - j \cdot 7,5)(3,33 + j \cdot 2) = 25 + j \cdot 15 - j \cdot 25 + 15 = 40 - j \cdot 10.$$

Комплекс падения напряжения на параллельных ветвях

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U} - \dot{U}_3 = 120 - (40 - j \cdot 10) = 80 + j \cdot 10.$$

Комплекс тока в первой ветви

$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_1} = \frac{80 + j \cdot 10}{10 - j \cdot 15} = \frac{(80 + j \cdot 10)(10 + j \cdot 15)}{10^2 + 15^2} = \\ = \frac{800 + j \cdot 1200 + j \cdot 100 - 150}{325} = 2 + j \cdot 4.$$

Модуль тока первой ветви

$$I_1 = \sqrt{2^2 + 4^2} = 4,47 \text{ а.}$$

Комплекс тока во второй ветви

$$\dot{i}_2 = \dot{i}_0 - \dot{i}_1 = (7,5 - j \cdot 7,5) - (2 + j \cdot 4) = \\ = 5,5 - j \cdot 11,5.$$

Модуль тока второй ветви

$$I_2 = \sqrt{5,5^2 + 11,5^2} \approx 12,75 \text{ а.}$$

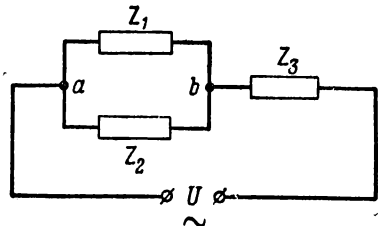


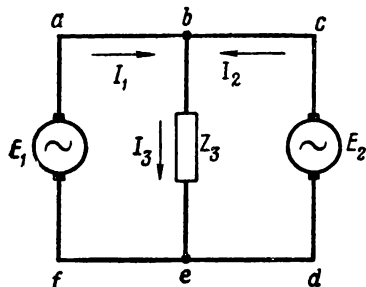
Рис. 282. Схема сложной цепи с одним источником электрической энергии

Пример 172. Два генератора работают на общий приемник энергии, имеющий сопротивление $Z_3 = 5,5 + j \cdot 4$ (рис. 283). Электродвижущие силы генераторов $E_1 = 120$ в и $E_2 = 110$ в совпадают по фазе. Сопротивления обмоток генераторов равны друг другу: $Z_1 = Z_2 = 0,5 + j \cdot 2$. Найти величину тока каждого генератора, ток в приемнике и напряжение на его зажимах.

Решение. Дано:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= 120 + j \cdot 0; & \dot{E}_2 &= 110 + j \cdot 0; & Z_1 &= 0,5 + j \cdot 2; & Z_2 &= 0,5 + j \cdot 2; \\ & & & & Z_3 &= 5,5 + j \cdot 4. \end{aligned}$$

Применяя законы Кирхгофа, составим три уравнения с тремя неизвестными токами. Для этого в первую очередь зададимся положительными направлениями токов, как это показано на рис. 283 стрелками. Уравнения составим, применяя первый закон Кирхгофа для узловой точки b и второй закон Кирхгофа для контуров $abefa$ и $bcdeb$:



или

$$I_1 + I_2 = I_3; \quad (I)$$

$$\dot{E}_1 = I_1 Z_1 + I_3 Z_3; \quad (II)$$

$$\dot{E}_2 = I_2 Z_2 + I_3 Z_3, \quad (III)$$

Рис. 283. Схема сложной цепи с двумя источниками электрической энергии

$$\begin{aligned} I_1 + I_2 &= I_3; \\ 120 &= I_1 (0,5 + j \cdot 2) + I_3 (5,5 + j \cdot 4); \\ 110 &= I_2 (0,5 + j \cdot 2) + I_3 (5,5 + j \cdot 4). \end{aligned}$$

Подставим вместо I_3 его выражение из уравнения (I) в уравнения (II) и (III):

$$120 = I_1 (0,5 + j \cdot 2) + (I_1 + I_2) (5,5 + j \cdot 4);$$

$$110 = I_2 (0,5 + j \cdot 2) + (I_1 + I_2) (5,5 + j \cdot 4),$$

или

$$120 = I_1 (6 + j \cdot 6) + I_2 (5,5 + j \cdot 4); \quad (II')$$

$$110 = I_2 (6 + j \cdot 6) + I_1 (5,5 + j \cdot 4). \quad (III')$$

Помножим уравнение (II') на $(6 + j \cdot 6)$, а (III') — на $(5,5 + j \cdot 4)$ и вычтем из первого уравнения второе:

$$120 (6 + j \cdot 6) = I_1 (6 + j \cdot 6) (6 + j \cdot 6) + I_2 (5,5 + j \cdot 4) (6 + j \cdot 6)$$

$$110 (5,5 + j \cdot 4) = I_1 (5,5 + j \cdot 4) (5,5 + j \cdot 4) + I_2 (5,5 + j \cdot 4) (6 + j \cdot 6)$$

$$120 (6 + j \cdot 6) - 110 (5,5 + j \cdot 4) = I_1 (6 + j \cdot 6) (6 + j \cdot 6) - I_1 (5,5 + j \cdot 4) (5,5 + j \cdot 4)$$

или

$$115 + j \cdot 280 = I_1 (-14,25 + j \cdot 28),$$

откуда

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{115 + j \cdot 280}{-14,25 + j \cdot 28} = \frac{(115 + j \cdot 280) (-14,25 - j \cdot 28)}{14,25^2 + 28^2} = \\ &= \frac{-1639 - j \cdot 3220 - j \cdot 3990 + 7840}{203 + 784} = \frac{6201 - j \cdot 7210}{987} \approx 6,3 - j \cdot 7,3. \end{aligned}$$

Подставив в уравнение (II') вместо \dot{I}_1 полученное выражение, найдем:

$$120 = (6,3 - j \cdot 7,3) (6 + j \cdot 6) + \dot{I}_2 (5,5 + j \cdot 4),$$

или

$$120 = 37,8 + j \cdot 37,8 - j \cdot 43,8 + 43,8 + \dot{I}_2 (5,5 + j \cdot 4),$$

откуда находим

$$\dot{I}_2 = \frac{38,4 + j \cdot 6}{5,5 + j \cdot 4} = \frac{(38,4 + j \cdot 6) (5,5 - j \cdot 4)}{5,5^2 + 4^2} = \frac{235,2 - j \cdot 120,6}{46,25} \approx 5,1 - j \cdot 2,6.$$

Подставляя в уравнение (I) вместо \dot{I}_1 и \dot{I}_2 полученные выражения, находим:

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 6,3 - j \cdot 7,3 + 5,1 - j \cdot 2,6 = 11,4 - j \cdot 9,9.$$

Напряжение на зажимах приемника найдем, вычтя из электродвижущей силы первого генератора величину падения напряжения в нем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_3 &= \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1 = 120 - (6,3 - j \cdot 7,3) (0,5 + j \cdot 2) = \\ &= 120 - (3,15 + j \cdot 12,6 - j \cdot 3,65 + 14,6) = 102,25 - j \cdot 8,95. \end{aligned}$$

Модуль тока первого генератора

$$I_1 = \sqrt{6,3^2 + 7,3^2} = 9,6 \text{ а.}$$

Модуль тока второго генератора

$$I_2 = \sqrt{5,1^2 + 2,6^2} = 5,7 \text{ а.}$$

Модуль тока потребителя

$$I_3 = \sqrt{11,4^2 + 9,9^2} = 15,1 \text{ а.}$$

Мощность, развиваемая первым генератором,

$$P_1 = \dot{E}_1 \dot{I}_1^* = 120 (6,3 + j \cdot 7,3) = 756 + j \cdot 876.$$

Мощность, развиваемая вторым генератором,

$$P_2 = \dot{E}_2 \dot{I}_2^* = 110 (5,1 + j \cdot 2,6) = 561 + j \cdot 286.$$

Мощность, поглощаемая потребителем,

$$P_3 = \dot{U}_3 \dot{I}_3^* = (102,25 - j \cdot 8,95) (11,4 + j \cdot 9,9) = 1255 + j \cdot 910.$$

Активная мощность, развиваемая генераторами,

$$P_{0a} = P_{1a} + P_{2a} = 756 + 561 = 1317 \text{ вт.}$$

Активная мощность, получаемая потребителем,

$$P_{3a} = 1255 \text{ вт.}$$

Активная мощность, потребляемая самими генераторами,

$$P_{Ga} = P_{0a} - P_{3a} = 1317 - 1255 = 62 \text{ вт.}$$

Проверка:

$$P_{\Gamma a} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = 9,6^2 \cdot 0,5 + 5,7^2 \cdot 0,5 = 62 \text{ вт.}$$

Пример 173. Для схемы, изображенной на рис. 284, определить токи и напряжения во всех участках цепи, мощность, расходуемую во всей цепи, а также сдвиг фаз тока I_0 и напряжения U , если $r_1 = 1,5 \text{ ом}$; $x_{C1} = 2 \text{ ом}$; $x_{L2} = 4 \text{ ом}$; $x_{C2} = 6 \text{ ом}$; $r_2 = 3 \text{ ом}$; $x_{L3} = 3 \text{ ом}$; $r_3 = 2 \text{ ом}$; $r_4 = 3 \text{ ом}$; $x_{C4} = 4 \text{ ом}$ и ток $I_2 = 2 \text{ а}$.

Решение. Выразим величины сопротивлений в комплексной форме:

$$Z_1 = r_1 - jx_{C1} = 1,5 - j \cdot 2 = 2,5e^{-j \cdot 53^\circ 10'};$$

$$Z_2 = r_2 + j(x_{L2} - x_{C2}) = 3 + j(4 - 6) = 3 - j \cdot 2 = 3,6e^{-j \cdot 33^\circ 40'};$$

$$Z_3 = r_3 + jx_{L3} = 2 + j \cdot 3 = 3,6e^{j \cdot 56^\circ 20'};$$

$$Z_4 = r_4 - jx_{C4} = 3 - j \cdot 4 = 5e^{-j \cdot 53^\circ 10'}.$$

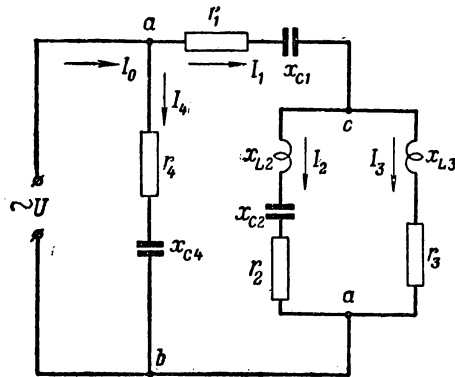


Рис. 284. Схема сложной цепи

Вектор тока I_2 направим по оси мнимых величин в сторону положительной полуоси, т. е.

$$\dot{i}_2 = I_2 e^{j \frac{\pi}{2}} = 2e^{j \cdot 90^\circ} = j \cdot 2.$$

Напряжение между точками c и d

$$\dot{U}_{cd} = \dot{i}_2 Z_2 = 2e^{j \cdot 90^\circ} \cdot 3,6e^{-j \cdot 33^\circ 40'} = 7,2e^{j \cdot 56^\circ 20'} = 4 + j \cdot 6.$$

Комплекс тока \dot{i}_3

$$\dot{i}_3 = \frac{\dot{U}_{cd}}{Z_3} = \frac{7,2e^{j \cdot 56^\circ 20'}}{3,6e^{j \cdot 56^\circ 20'}} = 2e^{j \cdot 0^\circ} = 2 + j \cdot 0 = 2.$$

Комплекс тока \dot{i}_1

$$\dot{i}_1 = \dot{i}_2 + \dot{i}_3 = j \cdot 2 + 2 = 2,82e^{j \cdot 45^\circ}.$$

Комплекс напряжения \dot{U}_{ac}

$$\dot{U}_{ac} = \dot{I}_1 Z_1 = 2,82e^{j \cdot 45^\circ} \cdot 2,5e^{-j \cdot 53^\circ 10'} = 7,05e^{-j \cdot 8^\circ 10'} = 7 - j.$$

Комплекс напряжения \dot{U}_{ab}

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{cd} + \dot{U}_{ac} = 4 + j \cdot 6 + 7 - j = 11 + j \cdot 5 = 12,1e^{j \cdot 24^\circ 30'}.$$

Комплекс тока \dot{I}_4

$$\dot{I}_4 = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_4} = \frac{12,1e^{j \cdot 24^\circ 30'}}{5e^{-j \cdot 53^\circ 10'}} = 2,42e^{j \cdot 77^\circ 40'} = 0,52 + j \cdot 2,36.$$

Комплекс тока \dot{I}_0 неразветвленного участка цепи

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_4 = 2 + j \cdot 2 + 0,52 + j \cdot 2,36 = 2,52 + j \cdot 4,36 = 5e^{j \cdot 60^\circ}.$$

Полная мощность, развиваемая источником электрической энергии в цепи,

$$P_t = \dot{U}_{ab} \dot{I}_0^* = 12,1e^{j \cdot 24^\circ 30'} \cdot 5e^{-j \cdot 60^\circ} = 60,5e^{-j \cdot 35^\circ 30'} \approx 49,2 - j \cdot 35,2.$$

Активная мощность, развиваемая источником электрической энергии в цепи,

$$P_a = 49,2 \text{ вт.}$$

Реактивная мощность, развиваемая источником электрической энергии в цепи,

$$P_r = 35,2 \text{ ва.}$$

Модули токов равны:

$$I_0 = 5 \text{ а; } I_1 = 2,82 \text{ а; } I_2 = 2 \text{ а; } I_3 = 2 \text{ а; } I_4 = 2,42 \text{ а.}$$

Модули напряжений равны:

$$U_{ab} = 12,1 \text{ в; } U_{ac} = 7,05 \text{ в; } U_{cd} = 7,2 \text{ в.}$$

Эквивалентное сопротивление всей цепи

$$Z_a = \frac{\dot{U}_{ab}}{\dot{I}_0} = \frac{12,1e^{j \cdot 24^\circ 30'}}{5e^{j \cdot 60^\circ}} = 2,42e^{-j \cdot 35^\circ 30'}.$$

Модуль комплекса эквивалентного сопротивления всей цепи

$$Z_a = 2,42 \text{ ом.}$$

Сдвиг фаз тока I_0 неразветвленного участка цепи и напряжения $U = U_{ab}$, приложенного к цепи, равен

$$\varphi_0 = -35^\circ 30'.$$

Следовательно, ток I_0 опережает по фазе напряжение U на угол $35^\circ 30'$, т. е. для генератора вся цепь в целом представляет нагрузку емкостного характера.

ГЛАВА XXV
МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

§ 129. ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА

Среди многофазных систем переменного синусоидального тока наиболее широкое применение получила трехфазная система.

Трехфазной системой называется совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют три электродвижущие силы одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол 120° ($\frac{2}{3}\pi$)

На рис. 285 приведена принципиальная схема простейшего генератора трехфазного тока. Здесь на неподвижном стальном

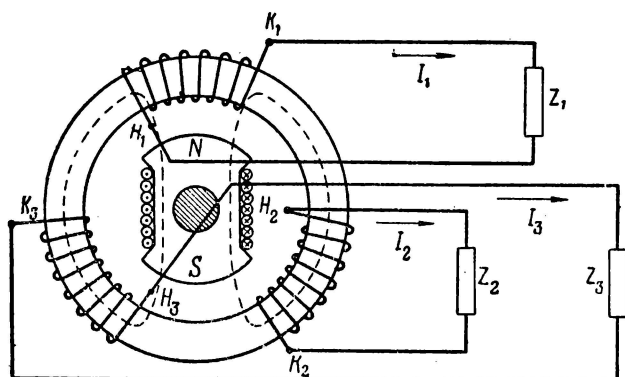


Рис. 285. Принципиальная схема генератора трехфазного тока

кольцевом (тороидальном) сердечнике размещены три совершенно одинаковые катушки, сдвинутые пространственно относительно друг друга на 120° , т. е. начала (H_1 , H_2 и H_3) обмоток катушек сдвинуты по окружности сердечника по отношению друг к другу на 120° . Точно так же размещены и концы (K_1 , K_2 и K_3) обмоток.

Кольцеобразный сердечник с размещенными на нем катушками является неподвижной частью генератора и называется статором.

Внутри статора вращается вокруг своей оси двухполюсный электромагнит, называемый ротором генератора.

Обмотка ротора генератора питается постоянным током от постороннего источника электрической энергии, обладающего постоянным напряжением. Следовательно, в системе данного ротора существует постоянное магнитное поле. Магнитный поток выходит из северного полюса ротора, проходит через воздушный зазор, далее попадает в стальное кольцо (статор), разветвляется на два направления и затем, вновь соединясь в общий магнитный поток, проходит через другой воздушный зазор, через южный полюс и замыкается на себя внутри сердечника ротора.

С помощью какого-либо первичного двигателя ротор генератора приводится во вращение с постоянной угловой скоростью. При своем вращении ротор увлекает за собой магнитное поле, создаваемое им, в результате чего в катушке статора изменяется магнитный поток, пронизывающий витки, и в них индуцируются электродвижущие силы. Конструктивно статор с катушками и ротор с полюсными наконечниками выполняются такими, что в катушках индуцируются синусоидальные электродвижущие силы, сдвинутые по фазе относительно друг друга на 120° . Следовательно, если в первой катушке индуцируется синусоидальная электродвижущая сила

$$e_1 = E_{1m} \cdot \sin \omega t,$$

то во второй катушке будет индуцироваться электродвижущая сила

$$e_2 = E_{2m} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right),$$

в третьей катушке — электродвижущая сила

$$e_3 = E_{3m} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right),$$

где e_1 , e_2 и e_3 — мгновенные значения электродвижущих сил в отдельных катушках;

E_{1m} , E_{2m} и E_{3m} — амплитуды электродвижущих сил в отдельных катушках.

Если к каждой из катушек при помощи специальных приспособлений подключить потребители электрической энергии, то в этих цепях будут проходить следующие электрические токи (рис. 285):

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= I_{1m} \cdot \sin (\omega t - \varphi_1) \\ i_2 &= I_{2m} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi - \varphi_2 \right) \\ i_3 &= I_{3m} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi - \varphi_3 \right) \end{aligned} \right\} \quad (411)$$

где i_1 , i_2 и i_3 — мгновенные значения токов в первой, второй и третьей катушках;

I_{1m} , I_{2m} и I_{3m} — амплитуды токов в катушках;

φ_1 , φ_2 , и φ_3 — углы сдвига фаз между электродвижущими силами и токами в катушках.

Трехфазная система называется симметричной, если амплитуды электродвижущих сил в отдельных фазах генератора одинаковы по величине, т. е.

$$E_{1m} = E_{2m} = E_{3m} = E_m.$$

В соответствии с этим

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= E_m \cdot \sin \omega t \\ e_2 &= E_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) \\ e_3 &= E_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) \end{aligned} \right\} \quad (412)$$

Трехфазная система, схематически изображенная на рис. 285, является электрически не связанной, т. е. в ней отдельные фазы представляют собой совершенно независимые друг от друга электрические цепи. Такая трехфазная система имеет мало преимуществ по сравнению с однофазной системой, а поэтому ее на практике не применяют.

Трехфазная система называется электрически связанной, если ее отдельные фазы соединены между собой электрически.

Подобная система обладает значительными преимуществами по сравнению с однофазной системой, так как она требует меньшей затраты металла на провода при передаче одной и той же мощности.

На рис. 286 показана часть схемы обычного трехфазного генератора. Здесь мы видим неподвижную часть генератора — статор, в пазы которого укладываются три отдельные обмотки, смещенные относительно друг друга на 120 электрических градусов, т. е. на одну треть двойного полюсного деления. Для наглядности обмотка первой фазы показана густо заштрихованной, обмотка второй фазы — слабо заштрихованной и обмотка третьей фазы — незаштрихованной. Внутри статора помещена подвижная часть генератора — ротор, на цилиндрической поверхности которого находятся электромагниты, питающиеся постоянным током от постороннего источника электрической энергии. Магнитное поле электромагнитов вращается вместе с ротором, на пути своего движения пересекает магнитными линиями неподвижные проводники статорной обмотки и индуцирует в них электродвижущую силу.

Приоритет изобретения трехфазной системы принадлежит русскому изобретателю М. О. Доливо-Добровольскому. В 1891 г.

Доливо-Добровольский продемонстрировал свою трехфазную установку, организовав с помощью ее передачу электрической энергии на расстояние примерно в 175 км. Успех этой опытной передачи электроэнергии на большое по тому времени расстояние обеспечил широкое внедрение трехфазной системы в электротехническую практику. В наши дни, когда электрификация развивается бурными темпами, когда электрическая энергия от мощных электростанций передается на многие сотни километров, трехфазная система электропередачи, как и прежде, играет первостепенную роль.

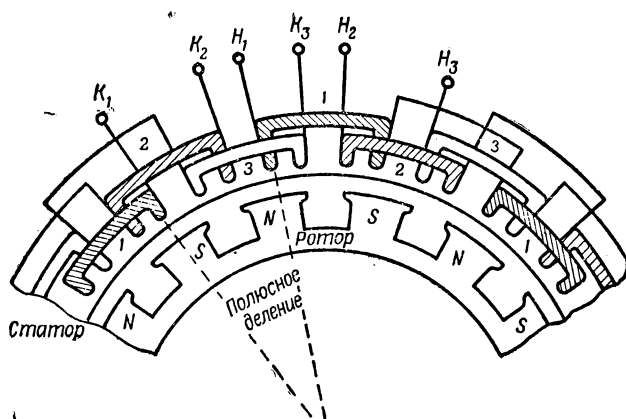


Рис. 286. Схема генератора трехфазного тока

В настоящее время трехфазная система является стандартной во многих государствах мира и в том числе у нас в Советском Союзе.

Работая в области совершенствования и развития трехфазной системы передачи электрической энергии, Доливо-Добровольский создал трехфазный генератор и разработал трехфазные системы, соединенные в «звезду» и «треугольник». Асинхронный электродвигатель трехфазной системы, изобретенный Доливо-Добровольским, нашел весьма широкое применение в электротехнической практике благодаря его высоким эксплуатационным качествам и простоте конструкции.

Одно из важнейших преимуществ трехфазной системы перед однофазной — меньшая затрата металла на провода при передаче одной и той же мощности (вес меди, идущей на провода и обмотки генераторов трехфазной системы, примерно на 25% меньше веса меди, необходимой для двух проводов однофазной системы). Кроме того, передача электрической энергии по проводам при трехфазной системе осуществляется с меньшими потерями.

Другое весьма важное преимущество трехфазной системы — возможность получения вращающегося магнитного поля, с помощью которого осуществляется работа ряда простых по конструкции и удобных в эксплуатации машин и приборов.

§ 130. ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА, СОЕДИНЕННАЯ «ЗВЕЗДОЙ»

Если в схеме, изображенной на рис. 285, начала всех трех фаз генератора (H_1 , H_2 и H_3) соединить в одну общую точку, называемую нулевой точкой генератора (O_r), а к концам фаз генератора присоединить линейные провода, идущие к потребителям, то получим трехфазную систему, соединенную «звездой». В этом случае три обратных провода, имеющих в трехфазной электрически не связанной системе, можно заменить

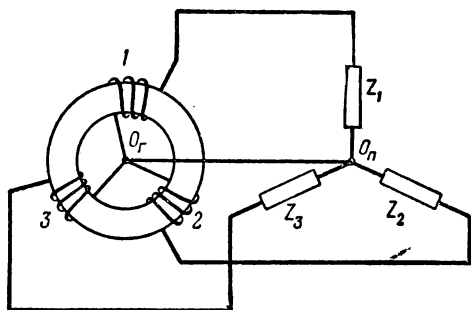


Рис. 287. Схема соединенной «звездой» трехфазной четырехпроводной системы с нулевым проводом

одним общим обратным проводом, обслуживающим одновременно все три фазы и называемым нулевым или нейтральным проводом. На рис. 287 приведена подобная схема, называемая трехфазной четырехпроводной схемой, соединенной «звездой». Здесь потребитель электрической энергии, питающийся трехфазным током, соединен также по схеме

«звезда»; его три фазы своими началами соединены в одну общую точку, называемую нулем приемника O_n , и концами присоединены к линейным проводам.

Нулевая точка генератора O_r соединена с нулевой точкой приемника O_n нулевым проводом. На рис. 288 показана обычная схема четырехпроводной трехфазной системы, соединенной «звездой»; здесь стрелками обозначены направления положительных токов. Условно будем считать, что положительные токи в линейных проводах направлены от генератора к приемнику, а в нулевом проводе — от приемника к генератору. В соответствии с этим для нулевой точки генератора или приемника первый закон Кирхгофа выразится следующей формулой:

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_0$$

т. е. мгновенное значение тока в нулевом проводе равно алгебраической сумме мгновенных токов в фазах трехфазной цепи.

Для действующих значений токов первый закон Кирхгофа можно выразить формулой

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = \bar{I}_0, \quad (413)$$

т. е. действующее значение тока в нулевом проводе равно геометрической сумме действующих значений токов в фазах трехфазной системы.

Так как все токи в трехфазной системе одинаковой частоты, то их можно изобразить на одной и той же векторной диаграмме. На рис. 289 показана векторная диаграмма токов и электродвижущих сил соединенной «звездой» трехфазной системы с нулевым проводом при неравномерной нагрузке фаз. Ток I_0 на векторной диаграмме получен путем геометрического сложения векторов токов I_1 , I_2 и I_3 .

Сопروتивление фаз генератора обычно мало, а поэтому и падение напряжения в них обычно незначительно. В силу этого трехфазную систему можно считать симметричной не только по отношению к электродвижущим силам в фазах генератора, но и по отношению к напряжениям на зажимах генератора, т. е. можно положить, что напряжения на зажимах трехфазного генератора по величине равны:

$$U_{1г} = U_{2г} = U_{3г} = U_g.$$

Если пренебречь падением напряжения в линейных проводах и нулевом проводе, то напряжения на зажимах для потребителя будут равны напряжениям на зажимах фаз генератора. Следовательно, при симметричной системе

$$U_1 = U_2 = U_3 = U_g,$$

где U_1 , U_2 и U_3 — напряжения на фазах потребителя.

Наличие нулевого провода в трехфазной системе, соединенной «звездой», обеспечивает независимость режима работы одной фазы

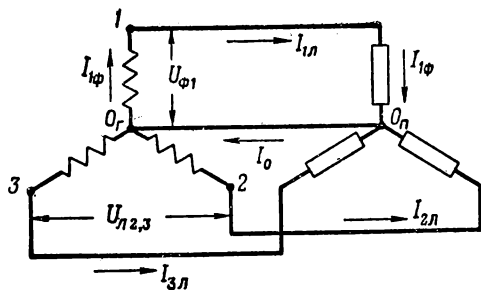


Рис. 288. Схема четырехпроводной трехфазной системы, соединенной «звездой»

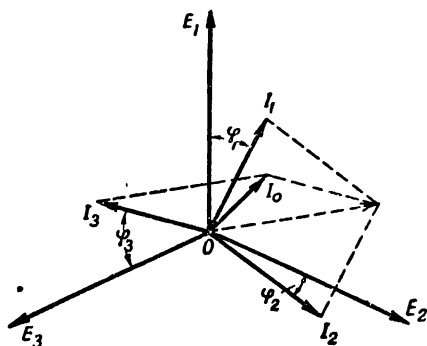


Рис. 289. Векторная диаграмма токов и электродвижущих сил в трехфазной системе, соединенной «звездой»

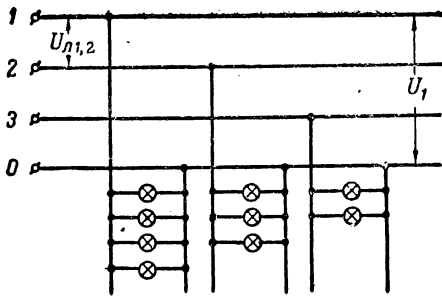


Рис. 290. Схема включения осветительной нагрузки в трехфазную четырехпроводную систему, соединенную «звездой»

потребителя от другой фазы, так как при малом падении напряжения в проводах напряжения на фазах потребителя относительно мало изменяются с изменением нагрузки фаз. Поэтому там, где нагрузка фаз неравномерна, как правило, применяется соединенная «звездой» трехфазная система с нулевым проводом. На рис. 290 приведена схема включения осветительной нагрузки в трехфазную

четырепроводную систему, соединенную «звездой»; лампы показаны включенными между линейными проводами и нулевым проводом.

Если известны сопротивления отдельных фаз приемника и напряжения на их зажимах, то по формуле закона Ома можно определить токи в отдельных фазах приемника и затем ток в нулевом проводе:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1}; \quad I_2 = \frac{U_2}{Z_2}; \quad I_3 = \frac{U_3}{Z_3}$$

и

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = \bar{I}_0,$$

где \bar{I}_1, \bar{I}_2 и \bar{I}_3 — векторы токов отдельных фаз приемника;

\bar{I}_0 — вектор тока нулевого провода;

U_1, U_2 и U_3 — напряжения на фазах приемника;

Z_1, Z_2 и Z_3 — сопротивления фаз приемника.

Пример 174. Напряжения на фазах приемника, соединенных «звездой» с нулевым проводом, одинаковы и равны $U = 120$ в. Сопротивления фаз приемника активные и равны: $r_1 = 10$ ом, $r_2 = 15$ ом и $r_3 = 20$ ом. Определить токи в фазах приемника и нулевом проводе.

Решение. Находим токи в фазах приемника:

$$I_1 = \frac{U}{r_1} = \frac{120}{10} = 12 \text{ а};$$

$$I_2 = \frac{U}{r_2} = \frac{120}{15} = 8 \text{ а};$$

$$I_3 = \frac{U}{r_3} = \frac{120}{20} = 6 \text{ а}.$$

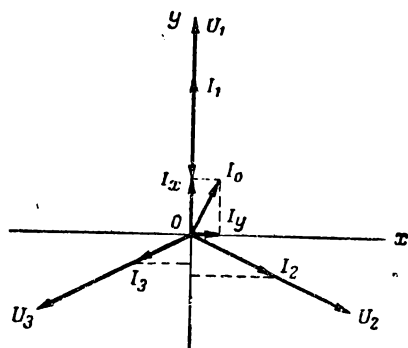


Рис. 291. Векторная диаграмма токов

Токи совпадают по фазе с напряжениями в фазах, а поэтому они сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол 120° . Построим векторную диаграмму токов I_1 , I_2 и I_3 (рис. 291) и, спроектировав векторы токов на взаимно перпендикулярные оси x и y , найдем:

$$I_x = I_{1x} + I_{2x} + I_{3x} = 0 + I_2 \cdot \cos 30^\circ - I_3 \cdot \cos 30^\circ = \\ = 8 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} - 6 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,73 \text{ а.}$$

$$I_y = I_{1y} + I_{2y} + I_{3y} = I_1 - I_2 \cdot \cos 60^\circ - I_3 \cdot \cos 60^\circ = 12 - 8 \cdot 0,5 - 6 \cdot 0,5 = 5 \text{ а.}$$

Отсюда по теореме Пифагора найдем, что

$$I_0 = \sqrt{I_x^2 + I_y^2} = \sqrt{1,73^2 + 5^2} = 5,3 \text{ а.}$$

Во всякой трехфазной системе различают линейные и фазовые напряжения и токи. Линейным напряжением (U_L) называется напряжение между линейными проводами (линейными зажимами), а линейным током (I_L) называется ток, протекающий по линейному проводу (рис. 288). Фазовым напряжением (U_Φ) называется напряжение на фазе, т. е. напряжение между линейным и нулевым проводами в схеме, соединенной «звездой», а фазовым током (I_Φ) — ток, протекающий по фазе генератора или приемника. Из рис. 288 видно, что линейный ток в трехфазной системе, соединенной «звездой», равен току фазовому, т. е.

$$I_{L1} = I_{\Phi 1}; \quad I_{L2} = I_{\Phi 2}; \quad I_{L3} = I_{\Phi 3}. \quad (414)$$

Выясним соотношение между линейными и фазовыми напряжениями.

Линейное напряжение между первым и вторым линейными проводами обозначим $U_{1,2}$, между вторым и третьим — $U_{2,3}$ и между третьим и первым — $U_{3,1}$ (рис. 292), где порядок индексов согласован с положительным направлением линейных напряжений. Например, положительное направление линейного напряжения $U_{1,2}$ — от зажима 1 к зажиму 2, линейного напряжения $U_{2,3}$ — от зажима 2 к зажиму 3 и линейного напряжения $U_{3,1}$ — от зажима 3 к зажиму 1. Обозначим мгновенные значения потенциалов точек 0, 1, 2 и 3 соответственно через φ_0 , φ_1 , φ_2 и φ_3 .

Мгновенное значение линейного напряжения между каждой парой линейных проводов равняется алгебраической разности мгновенных значений потенциалов соответствующих линейных зажимов (1, 2 и 3):

$$u_{1,2} = \varphi_1 - \varphi_2; \quad u_{2,3} = \varphi_2 - \varphi_3; \quad u_{3,1} = \varphi_3 - \varphi_1.$$

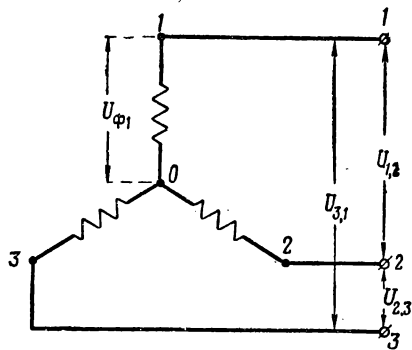


Рис. 292. Схема трехфазной цепи соединенной «звездой», без нулевого провода

Мгновенное значение фазового напряжения равняется алгебраической разности мгновенных значений потенциалов точки (зажима) конца фазы и нулевой точки (нулевого зажима):

$$u_1 = \varphi_1 - \varphi_0; \quad u_2 = \varphi_2 - \varphi_0; \quad u_3 = \varphi_3 - \varphi_0,$$

где u_1 , u_2 и u_3 — мгновенные значения фазовых напряжений соответственно первой, второй и третьей фаз.

Отсюда находим, что

$$\varphi_1 = u_1 - \varphi_0; \quad \varphi_2 = u_2 - \varphi_0; \quad \varphi_3 = u_3 - \varphi_0.$$

Принимая во внимание последние соотношения, мгновенные значения линейных напряжений можно выразить следующими формулами:

$$\begin{aligned} u_{1,2} &= \varphi_1 - \varphi_2 = (u_1 - \varphi_0) - (u_2 - \varphi_0) = u_1 - u_2; \\ u_{2,3} &= \varphi_2 - \varphi_3 = (u_2 - \varphi_0) - (u_3 - \varphi_0) = u_2 - u_3; \\ u_{3,1} &= \varphi_3 - \varphi_1 = (u_3 - \varphi_0) - (u_1 - \varphi_0) = u_3 - u_1, \end{aligned}$$

т. е. мгновенные значения линейных напряжений равны алгебраической разности мгновенных значений соответствующих фазовых напряжений.

Но если мгновенные значения линейных напряжений равны алгебраической разности фазовых напряжений, то действующее значение линейных напряжений равняется геометрической разности соответствующих фазовых напряжений.

Следовательно, для определения действующих значений линейных напряжений надо на векторной диаграмме произвести действия геометрического вычитания над соответствующими векторами фазовых напряжений (рис. 293):

$$\bar{U}_{1,2} = \bar{U}_1 - \bar{U}_2; \quad \bar{U}_{2,3} = \bar{U}_2 - \bar{U}_3; \quad \bar{U}_{3,1} = \bar{U}_3 - \bar{U}_1. \quad (415)$$

Для определения линейного напряжения $\bar{U}_{1,2}$ надо из вектора \bar{U}_{φ_1} вычесть вектор \bar{U}_{φ_2} , т. е., иначе говоря, к вектору \bar{U}_{φ_1} прибавить вектор $-\bar{U}_{\varphi_2}$ (рис. 293). Проведя вектор $-\bar{U}_{\varphi_2}$, равный и противоположный по направлению вектору \bar{U}_{φ_2} , сложим его геометрически с вектором \bar{U}_{φ_1} . Полученная диагональ параллелограмма даст нам величину и положение на векторной диаграмме линейного напряжения $\bar{U}_{1,2}$, т. е. напряжения между первой и второй фазами. Проектируя обе стороны параллелограмма \bar{U}_{φ_1} и $-\bar{U}_{\varphi_2}$ на его диагональ, получим результирующий вектор, т. е. вектор линейного напряжения. Аналогично этому построены векторы линейных напряжений $\bar{U}_{2,3}$ и $\bar{U}_{3,1}$.

Если трехфазная система симметрична относительно напряжений, т. е. $U_{\varphi_1} = U_{\varphi_2} = U_{\varphi_3} = U_{\varphi}$, и они сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол $\frac{2}{3} \pi$, то линейное напряжение

будет в $\sqrt{3}$ раз больше напряжения фазового. Это соотношение легко получить из векторной диаграммы (рис. 293), из которой следует, что

$$U_{л,2} = U_{\phi 1} \cdot \cos 30^\circ + U_{\phi 2} \cdot \cos 30^\circ = 2U_{\phi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} U_{\phi}.$$

Итак, для симметричной относительно напряжений трехфазной системы, соединенной «звездой»,

$$U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi}. \quad (416)$$

Пример 175. Определить линейное напряжение в трехфазной, симметричной относительно напряжений системе, если $U_{\phi} = 127$ в.

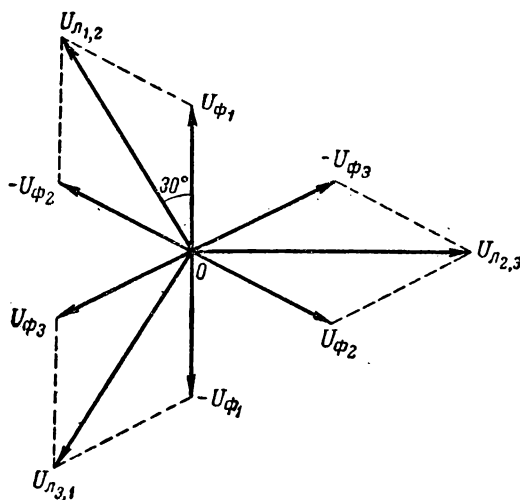


Рис. 293. Векторная диаграмма линейных и фазовых напряжений трехфазной системы, соединенной «звездой»

Решение. По формуле (416) находим

$$U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 127 = 220 \text{ в.}$$

Нагрузка на фазах трехфазной системы называется равномерной, если токи во всех фазах одинаковы по величине и сдвинуты по фазе на одинаковые углы относительно своих напряжений, т. е. сопротивления фаз одинаковы по величине и по характеру:

$$Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z.$$

Следовательно, если при равномерной нагрузке фаз

$$i_1 = I_m \cdot \sin \omega t; \quad i_2 = I_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right);$$

$$i_3 = I_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right),$$

то

$$\begin{aligned} i_1 + i_2 + i_3 &= I_m \cdot [\sin \omega t + \sin (\omega t - 120^\circ) + \sin (\omega t - 240^\circ)] = \\ &= I_m \cdot (\sin \omega t + \sin \omega t \cdot \cos 120^\circ - \cos \omega t \cdot \sin 120^\circ + \\ &\quad + \sin \omega t \cdot \cos 240^\circ - \cos \omega t \cdot \sin 240^\circ) = \\ &= I_m \cdot \left(\sin \omega t - 0,5 \cdot \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega t - 0,5 \cdot \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega t \right) = 0, \end{aligned}$$

т. е. алгебраическая сумма мгновенных значений токов в трехфазной системе, соединенной «звездой», при равномерной нагрузке фаз равна нулю.

Но если сумма мгновенных значений токов равна нулю, то геометрическая сумма действующих значений токов при равномерной нагрузке фаз также будет равна нулю:

$$\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = I_0 = 0.$$

Эту формулу легко проверить путем построения векторной диаграммы токов (рис. 294). Если результирующий ток в нулевом проводе при равномерной нагрузке фаз равен нулю, то отпадает необходимость в самом нулевом проводе. В этом случае можно ограничиться только тремя проводами, т. е. перейти к трехфазной трехпроводной системе. Это даст большую экономию меди при передаче одной и той же мощности потребителю.

При равномерной нагрузке фаз трехфазная система симметрична относительно напряжений и линейное напряжение становится в $\sqrt{3}$ раз больше фазовых.

Трехфазную трехпроводную систему, соединенную «звездой», применяют там, где нагрузка фаз строго равномерна, например, когда к трехфазной сети подключается трехфазный электродвигатель (рис. 295). Если же при трехфазной трехпроводной системе, соединенной «звездой», нагрузка оказывается неравномерной, то это ведет к перераспределению напряжений на фазах приемника в соответствии с их нагрузками и система перестает быть симметричной. В этом случае могут возникнуть перенапряжения на отдельных фазах приемника. Например, если в соединенной «звездой» трехфазной системе без нулевого провода,

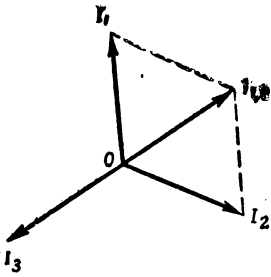


Рис. 294. Геометрическая сумма действующих значений токов при равномерной нагрузке фаз равна нулю

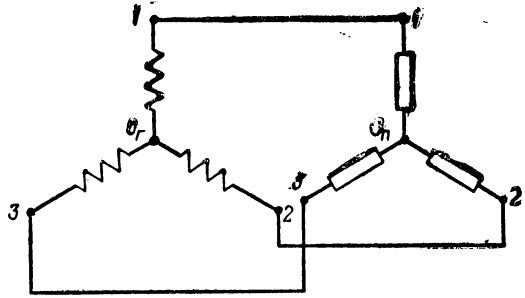


Рис. 295. Схема трехфазной трехпроводной системы, соединенной „звездой“

равномерно нагруженной, одна из фаз приемника случайно закоротится, то на остальных фазах приемника напряжение возрастет в $\sqrt{3}$ раз против нормального, т. е. фазовые напряжения станут равными по величине линейным напряжениям.

Пример 176. В трехфазной трехпроводной системе фазовое напряжение на каждой фазе потребителя равно $U = 127$ в, если фазы нагружены равномерно. Определить, как оно распределится на фазах приемника, если первая из фаз приемника окажется закороченной.

Решение. Напряжение на первой фазе $U_1 = 0$, так как сопротивление фазы равно нулю.

Напряжения на второй и третьей фазах будут равны:

$$U_2 = U_3 = U\sqrt{3} = 127 \cdot \sqrt{3} = 220 \text{ в.}$$

§ 131. ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА, СОЕДИНЕННАЯ «ТРЕУГОЛЬНИКОМ»

При соединении «треугольником» обмотки фаз генератора соединяются так, что начало каждой из фаз соединяется с концом предыдущей фазы и к точкам соединения фаз присоединяются линейные провода (рис. 296).

На рис. 297 показана схема трехфазной системы, в которой обмотки фаз генератора и фазы потребителя соединены «треугольником». Из рис. 297 видно, что фазы генератора образуют замкнутый на себя контур. Однако если трехфазная система симметрична, то для любого момента

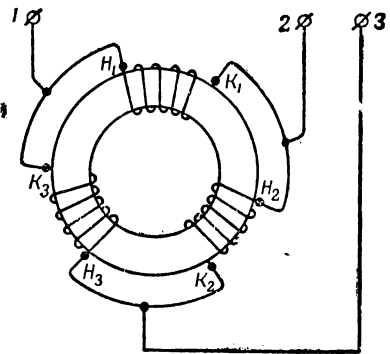


Рис. 296. Схема трехфазной системы, соединенной «треугольником»

времени в треугольнике фаз генератора алгебраическая сумма мгновенных значений электродвижущих сил равна нулю, так как

$$e_1 + e_2 + e_3 = E_m \cdot \sin \omega t + E_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) + \\ + E_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) = 0,$$

а поэтому опасности короткого замыкания фаз генератора здесь нет. В несимметричной трехфазной системе при разомкнутой внешней цепи в треугольнике фаз генератора проходит ток, величина которого зависит от того, насколько несимметрична система.

Условимся в схемах трехфазной системы, соединенной «треугольником», положительными направлениями токов в фазах генератора (рис. 297) считать направления против движения часо-

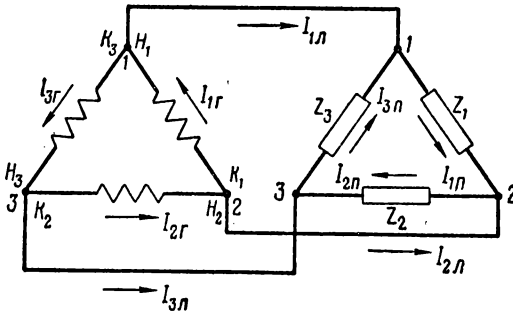


Рис. 297. Схема генератора и потребителя трехфазной системы, соединенной «треугольником»

вой стрелки. В линейных проводах положительными направлениями токов будем считать направления от генератора к приемнику, а в фазах приемника — направление движения часовой стрелки.

В соответствии с этим уравнения первого закона Кирхгофа для вершин (I) треугольников фаз генератора и приемника можем записать следующим образом:

$$\bar{I}_{1Г} = \bar{I}_{1Л} + \bar{I}_{3Г} \text{ и } \bar{I}_{1П} = \bar{I}_{1Л} + \bar{I}_{3П} \text{ и т. д.,}$$

откуда

$$\bar{I}_{1Л} = \bar{I}_{1Г} - \bar{I}_{3Г} \text{ и } \bar{I}_{1Л} = \bar{I}_{1П} - \bar{I}_{3П}, \quad (417)$$

т. е. ток в первом линейном проводе равен геометрической разности токов первой и третьей фаз генератора или первой и третьей фаз приемника.

Аналогично этому

$$\bar{I}_{2л} = \bar{I}_{2г} - \bar{I}_{1г} \text{ и } \bar{I}_{2л} = \bar{I}_{2п} - \bar{I}_{1п};$$

$$\bar{I}_{3л} = \bar{I}_{3г} - \bar{I}_{2г} \text{ и } \bar{I}_{3л} = \bar{I}_{3п} - \bar{I}_{2п}.$$

Следует обратить внимание на то, что для определения линейных токов надо брать геометрическую разность последующего и предыдущего токов, например, чтобы определить второй линейный ток $I_{2л}$, надо из второго фазового тока $I_{2г}$ вычесть геометрически первый фазовый ток $I_{1г}$ и т. д.

При соединении «треугольником» каждая фаза приемника находится под линейным напряжением, а поэтому, если пренебречь падением напряжения в проводах, всякое изменение нагрузки в той или иной фазе потребителя не влияет на величину напряжений в других его фазах. Это — одно из основных достоинств таких систем.

При соединении «треугольником» линейное и фазовое напряжения равны друг другу, что очевидно из построения самой схемы, где фазовое и линейное напряжения — по сути дела одно и то же.

На рис. 298 приведена векторная диаграмма токов трехфазной системы, соединенной «треугольником», и показаны линейные токи как геометрические разности фазовых токов.

Исходя из векторной диаграммы, можем написать, что

$$I_{1л} = I_{1г} \cdot \cos 30^\circ +$$

$$+ I_{3г} \cdot \cos 30^\circ = 2I_{г} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_{г},$$

где $I_{1л}$ — линейный ток в линейном проводе первой фазы;

$I_{1г}$, $I_{3г}$ — фазовые токи соответственно в первой и третьей фазах генератора.

Аналогично

$$I_{2л} = \sqrt{3} I_{г} \text{ и } I_{3л} = \sqrt{3} I_{г},$$

т. е. при равномерной нагрузке фаз треугольника линейные токи в $\sqrt{3}$ раз больше фазовых токов:

$$I_{л} = \sqrt{3} I_{ф}, \quad (418)$$

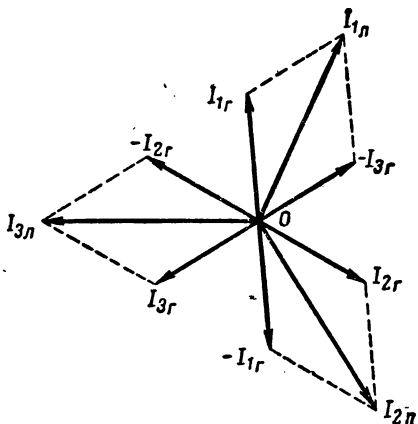


Рис. 298. Векторная диаграмма токов трехфазной системы, соединенной «треугольником»

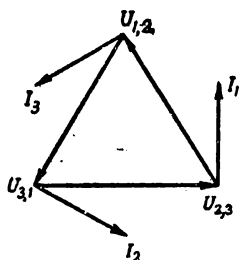


Рис. 299. Векторная диаграмма токов и напряжений трехфазной системы, соединенной «треугольником»

где $I_{л}$ — линейный ток;
 $I_{ф}$ — фазовый ток.

На рис. 299 показана векторная диаграмма токов и напряжений. Линейные напряжения представлены здесь в виде замкнутого равнобедренного треугольника, а фазовые токи показаны отстающими от напряжений по фазе (случай индуктивных нагрузок фаз).

Геометрическая сумма линейных токов для любой нагрузки фаз равна нулю:

$$\vec{I}_{1л} + \vec{I}_{2л} + \vec{I}_{3л} = (\vec{I}_1 - \vec{I}_3) + (\vec{I}_2 - \vec{I}_1) + (\vec{I}_3 - \vec{I}_2) = 0.$$

Этого, конечно, нельзя сказать про токи фазовые, так как геометрическая сумма фазовых токов «треугольника» равна нулю только при равномерной нагрузке фаз.

Если заданы напряжения на фазах приемника и сопротивления фаз, то величина тока в фазах определится по закону Ома:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1}; \quad I_2 = \frac{U_2}{Z_2}; \quad I_3 = \frac{U_3}{Z_3}.$$

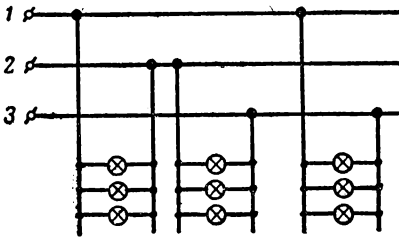


Рис. 300. Схема включения осветительной нагрузки в трехфазную систему, соединенную «треугольником»

На рис. 300 показана схема включения осветительной нагрузки — электрических ламп — «треугольником».

Пример 177. Нагрузка соединена «треугольником», и сопротивления фаз равны между собой: $r_1 = r_2 = r_3 = 11$ ом. Определить фазовые и линейные токи в этой трехфазной системе, если линейное напряжение у потребителя $U_{л} = 220$ в.

Решение. Фазовое напряжение при соединении «треугольником» равно линейному напряжению:

$$U = U_{л} = 220 \text{ в.}$$

Фазовые токи

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{U}{r} = \frac{220}{11} = 20 \text{ а.}$$

Линейные токи

$$I_{1л} = I_{2л} = I_{3л} = \sqrt{3} \cdot 20 = 34,6 \text{ а.}$$

Соединение «треугольником» выгодно применять для потребителей в том случае, когда необходимо на его фазы подать более высокое напряжение. Например, если трехфазный асинхронный электродвигатель включить «звездой», каждая из его фаз будет под напряжением 127 в, а в случае соединения «треугольником» — 220 в, что значительно повысит мощность электродвигателя.

§ 132. МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Мгновенная мощность трехфазной системы равна сумме мгновенных мощностей отдельных фаз:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3. \quad (419)$$

Если все фазы нагружены равномерно, то

$$\begin{aligned} p &= U_m \cdot \sin \omega t \cdot I_m \cdot \sin (\omega t - \varphi) + \\ &+ U_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) I_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi - \varphi \right) + \\ &+ U_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) I_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi - \varphi \right). \end{aligned}$$

После ряда тригонометрических преобразований, которые мы здесь опускаем, получим

$$p = \frac{3}{2} U_m I_m \cdot \cos \varphi,$$

или

$$p = 3UI \cdot \cos \varphi. \quad (420)$$

Из формулы (420) следует, что мгновенная мощность равномерно нагруженной трехфазной системы не зависит от времени, т. е. она постоянна.

Многофазная система, в которой мгновенная мощность не зависит от времени, называется системой уравновешенной. Следовательно, равномерно нагруженная трехфазная система — это система уравновешенная.

Если мгновенное значение мощности не зависит от времени, то среднее значение мощности равно ее мгновенному значению:

$$P = 3UI \cdot \cos \varphi. \quad (421)$$

При соединении «звездой»

$$I_\phi = I_\pi \text{ и } U_\phi = \frac{U_\pi}{\sqrt{3}},$$

а поэтому

$$P = \sqrt{3} U_\pi I_\pi \cdot \cos \varphi.$$

Аналогично при соединении «треугольником»

$$I_\phi = \frac{I_\pi}{\sqrt{3}} \text{ и } U_\pi = U_\phi,$$

а поэтому

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cdot \cos \varphi, \quad (422)$$

где φ — угол сдвига фаз тока и напряжения в фазах приемника.

Пример 178. В трехфазной системе, соединенной «звездой» и нагруженной равномерно, линейное напряжение $U_{\text{л}} = 120$ в, а линейный ток $I_{\text{л}} = 15$ а. Определить мощность, развиваемую током в этой системе, если коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,8$.

Решение. По формуле (421) находим

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cdot \cos \varphi = 1,73 \cdot 120 \cdot 15 \cdot 0,8 = 2491 \text{ вт.}$$

Пример 179. Электродвигатель трехфазного тока с полезной мощностью $P_1 = 25$ л. с., коэффициентом полезного действия $\eta = 83,5\%$ и коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,8$ подключен к трехфазной сети, в которой линейное напряжение $U_{\text{л}} = 220$ в. Определить, какой ток потребляет данный электродвигатель при полной нагрузке и под каким напряжением находятся его фазовые обмотки, соединенные «звездой».

Решение. Полезная мощность электродвигателя

$$P_1 = 25 \cdot 736 = 18\,400 \text{ вт.}$$

Полная мощность, потребляемая электродвигателем,

$$P = \frac{P_1}{\eta} = \frac{18\,400}{0,835} = 22\,036 \text{ вт.}$$

Линейный ток

$$I_{\text{л}} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{л}} \cdot \cos \varphi} = \frac{22\,036}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,8} = 72,4 \text{ а.}$$

Фазовое напряжение

$$U = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{1,73} = 127 \text{ в.}$$

§ 133. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Допустим, что три одинаковые плоские катушки расположены в пространстве так, что их оси составляют углы, равные $\frac{2}{3}\pi$ (рис. 301). Катушки неподвижно закреплены и находятся под напряжением трехфазной сети, так что токи в них равны

$$i_1 = I_m \cdot \sin \omega t;$$

$$i_2 = I_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right);$$

$$i_3 = I_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right).$$

Если в катушках нет стальных сердечников, то магнитный поток в каждой из них изменяется пропорционально току, т. е.

$$\Phi_1 = \Phi_m \cdot \sin \omega t;$$

$$\Phi_2 = \Phi_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right);$$

$$\Phi_3 = \Phi_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right).$$

Определим результирующий магнитный поток, создаваемый системой из трех заданных катушек, питающихся трехфазным током.

Как известно, положительный ток в катушке и положительный магнитный поток, создаваемый током катушки, связаны правилом правого винта. Если вращательное движение винта совпадает с направлением положительного тока в катушке, то поступательное движение винта совпадает с направлением положительного магнитного поля в катушке. На рис. 301 положительные направления токов обозначены крестиками и точками в сечении проводов катушек. Крестик показывает, что ток направлен от нас за плоскость рисунка, а точка — что он направлен из-за плоскости рисунка к нам. В соответствии с этим положительные магнитные потоки катушек будут сдвинуты пространственно относительно друг друга на угол 120° . На рис. 302 эти магнитные потоки представлены в виде векторов Φ_{1m} , Φ_{2m} и Φ_{3m} (векторов амплитуд магнитных потоков). Эти векторы, расположенные по отноше-

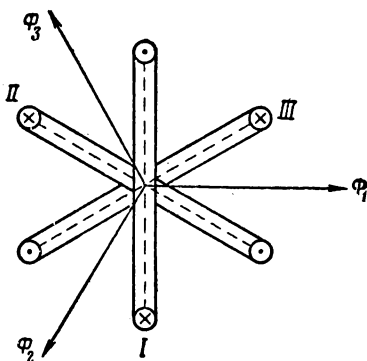


Рис. 301. Три катушки расположены в пространстве под углом 120° одна относительно другой

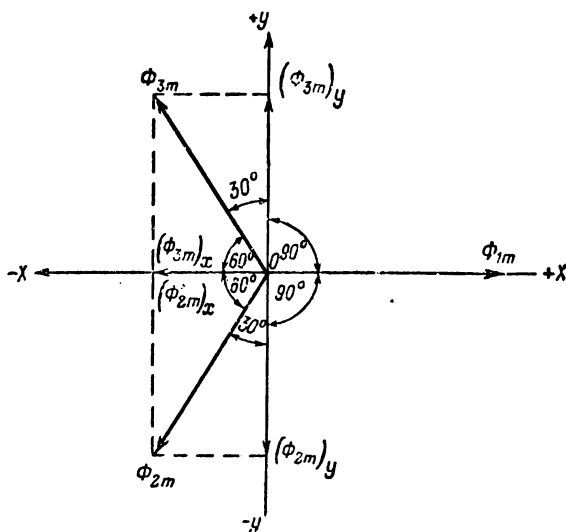


Рис. 302. Векторы положительных магнитных потоков сдвинуты на 120° один относительно другого

нию друг к другу под углом 120° , т. е. так же, как оси катушек, не являются вращающимися векторами в системе катушек, так как каждый из них направлен по оси своей катушки и может менять свое направление только на противоположное. Однако заданные магнитные потоки изменяются по закону синуса, а поэтому каждый из них периодически меняет свое направление в катушке на противоположное.

Чтобы определить результирующее магнитное поле в системе, надо сложить векторы геометрически. Для этой цели разложим каждый вектор магнитного потока на две составляющие, из которых одну направим по оси x , другую — по оси y (рис. 302). При этом полагаем, что положительная полуось Ox направлена в сторону вектора Φ_{1m} , т. е. положительного потока первой катушки, а положительная полуось Oy направлена перпендикулярно оси x и против движения часовой стрелки от положительной полуоси Ox .

Разложив векторы амплитуд магнитных потоков Φ_{1m} , Φ_{2m} и Φ_{3m} по осям x и y , получим

$$(\Phi_{1m})_x = \Phi_{1m} \cdot \cos 0^\circ = \Phi_{1m};$$

$$(\Phi_{2m})_x = -\Phi_{2m} \cdot \cos 60^\circ = -\frac{\Phi_{2m}}{2};$$

$$(\Phi_{3m})_x = -\Phi_{3m} \cdot \cos 60^\circ = -\frac{\Phi_{3m}}{2}$$

и

$$(\Phi_{1m})_y = \Phi_{1m} \cdot \cos 90^\circ = 0;$$

$$(\Phi_{2m})_y = -\Phi_{2m} \cdot \cos 30^\circ = -\frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_{2m};$$

$$(\Phi_{3m})_y = +\Phi_{3m} \cdot \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_{3m}.$$

Но каждый из магнитных потоков синусоидален, а поэтому мгновенные значения составляющих магнитных потоков будут определяться следующими выражениями:

$$(\Phi_1)_x = \Phi_{1m} \cdot \sin \omega t;$$

$$(\Phi_2)_x = (\Phi_{2m})_x \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) = -\frac{\Phi_{2m}}{2} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right);$$

$$(\Phi_3)_x = (\Phi_{3m})_x \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) = -\frac{\Phi_{3m}}{2} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right).$$

Для определения мгновенного значения результирующего магнитного потока необходимо последние три равенства сложить алгебраически. Принимая во внимание, что по условию $|\Phi_{1m}| = |\Phi_{2m}| = |\Phi_{3m}| = \Phi_m$, т. е. численные значения амплитуд магнитных потоков равны друг другу, получим

$$\begin{aligned} (\Phi_0)_x &= \Phi_m \cdot \sin \omega t - \frac{\Phi_m}{2} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) - \frac{\Phi_m}{2} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) = \\ &= \Phi_m \left[\sin \omega t - \frac{1}{2} (\sin \omega t \cdot \cos 120^\circ - \cos \omega t \cdot \sin 120^\circ) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} (\sin \omega t \cdot \cos 240^\circ - \cos \omega t \cdot \sin 240^\circ) \right] = \\ &= \Phi_m \left(\sin \omega t + \frac{1}{4} \cdot \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \cos \omega t + \frac{1}{4} \cdot \sin \omega t - \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \cos \omega t \right), \end{aligned}$$

или, иначе,

$$(\Phi_0)_x = 1,5 \Phi_m \cdot \sin \omega t,$$

где $(\Phi_0)_x$ — составляющая результирующего магнитного поля по оси x . Аналогично определяем составляющую результирующего магнитного поля по оси y :

$$(\Phi_1)_y = (\Phi_{1m})_y \cdot \sin \omega t = 0,$$

так как $(\Phi_{1m})_y = 0$;

$$(\Phi_2)_y = (\Phi_{2m})_y \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) = -\frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_{2m} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right);$$

$$(\Phi_3)_y = (\Phi_{3m})_y \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right) = \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_{3m} \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right).$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} (\Phi_0)_y &= (\Phi_1)_y + (\Phi_2)_y + (\Phi_3)_y = 0 - \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} \pi \right) + \\ &+ \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} \pi \right), \end{aligned}$$

или, иначе,

$$\begin{aligned} (\Phi_0)_y &= \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_m [\sin(\omega t - 240^\circ) - \sin(\omega t - 120^\circ)] = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_m (\sin \omega t \cdot \cos 240^\circ - \cos \omega t \cdot \sin 240^\circ - \sin \omega t \cdot \cos 120^\circ + \cos \omega t \cdot \sin 120^\circ) = \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} \Phi_m \left(-\frac{1}{2} \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega t + \frac{1}{2} \cdot \sin \omega t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega t \right), \end{aligned}$$

откуда

$$(\Phi_0)_y = 1,5 \Phi_m \cdot \cos \omega t.$$

Следовательно, составляющие результирующего магнитного поля имеют одинаковые амплитуды, равные $\Phi_0 = 1,5 \Phi_m$. Однако составляющая по оси x изменяется по закону синуса, а составляющая по оси y — по закону косинуса.

Чтобы получить результирующий магнитный поток для любого момента времени t , необходимо геометрически сложить мгновенные значения составляющих результирующего магнитного поля по осям x и y . Так как эти составляющие пространственно расположены под углом 90° относительно друг друга, то будем складывать их по правилу прямоугольного треугольника (рис. 303):

$$\Phi_0 = \sqrt{(\Phi_0)_x^2 + (\Phi_0)_y^2} = \sqrt{(1,5 \Phi_m \cdot \sin \omega t)^2 + (1,5 \Phi_m \cdot \cos \omega t)^2},$$

или

$$\Phi_0 = 1,5 \Phi_m. \quad (423)$$

Из полученной формулы следует, что величина результирующего магнитного потока не зависит от времени и в 1,5 раза больше амплитуды любого из магнитных потоков, создаваемых заданными катушками.

Теперь определим, какое же направление в пространстве имеет результирующий магнитный доток. Из рис. 303 видно, что вектор Φ_0 составляет с положительной полуосью Ox угол α , который определим из формулы

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(\Phi_0)_y}{(\Phi_0)_x} = \frac{1,5\Phi_m \cdot \cos \omega t}{1,5\Phi_m \cdot \sin \omega t}$$

или, иначе,

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{ctg} \omega t = \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \omega t \right),$$

откуда

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \omega t,$$

т. е. угол, составленный вектором Φ_0 результирующего магнитного потока с положительной полуосью Ox , изменяется пропорционально времени.

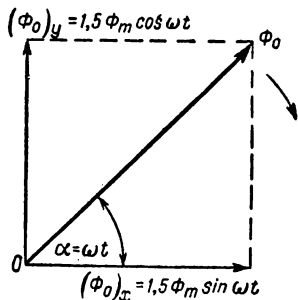


Рис. 303. Величина и направление результирующего магнитного потока Φ

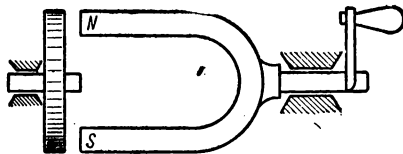


Рис. 304. Вращающийся магнит при своем движении увлекает за собой металлический диск

В момент времени $t=0$ $\alpha = \frac{\pi}{2}$, т. е. вектор Φ_0 по своему направлению совпадает с положительной полуосью Oy . В момент времени, когда $\omega t = \frac{\pi}{2}$, $\alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2} = 0$, т. е. вектор Φ_0 совпадает по направлению с положительной полуосью Ox . В момент времени, когда $\omega t = \pi$, $\alpha = \frac{\pi}{2} - \pi = -\frac{\pi}{2}$, т. е. вектор Φ_0 совпадает по направлению с отрицательной полуосью Oy , и т. д. Это означает, что вектор Φ_0 результирующего магнитного потока, оставаясь неизменным по величине, вращается по часовой стрелке с постоянной угловой скоростью ω . Следовательно, за один период тока вектор Φ_0 делает один полный оборот в системе из трех заданных катушек, питающихся трехфазным током. Магнитное поле подобного рода называется вращающимся магнитным полем трехфазного тока.

Рассмотренное нами магнитное поле двухполюсное, оно напоминает магнитное поле стержневого магнита, вращающегося вокруг своей поперечной оси, проходящей через его середину.

Для того чтобы переменить направление вращения магнитного поля в системе катушек, питающихся трехфазным током, надо поменять местами концы проводов каких-либо двух катушек, например, первую катушку, ранее подключенную к первой фазе генератора, подключить к его второй фазе, а вторую катушку, ранее подключенную ко второй фазе генератора, подключить к первой его фазе.

Вращающиеся магнитные поля широко используются на практике, например, в асинхронных электродвигателях переменного тока, индукционных электроизмерительных приборах, с которыми подробно ознакомимся впоследствии.

Если во вращающееся магнитное поле внести металлическое тело, например металлический диск, могущий вращаться вокруг своей оси, то магнитное поле, перемещаясь относительно диска, будет индуцировать в нем вихревые токи. Благодаря взаимодействию этих токов с вращающимся магнитным полем диск начнет вращаться в ту же сторону, что и магнитное поле. Вращающееся магнитное поле при своем движении как бы увлекает за собой диск. На рис. 304 показан простейший опыт подобного рода. Если вращать постоянный магнит перед диском, то диск также будет вращаться в ту же сторону, что и магнит. Так как металлический диск обладает некоторой инерцией, т. е. создает сопротивление своему движению, то, естественно, число его оборотов будет меньше, чем число оборотов вращающегося магнитного поля. Чем тяжелее диск, тем больше сопротивление его движению и тем меньше число его оборотов по сравнению с оборотами вращающегося магнитного поля. Такое движение диска по отношению к движению вращающегося магнитного поля называется асинхронным, т. е. не совпадающим по числу оборотов.

§ 134. ДВУХФАЗНОЕ ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Двухфазным током называется совокупность двух однофазных токов, сдвинутых по фазе относительно друг друга на угол $\frac{\pi}{2}$, т. е.

$$i_1 = I_m \cdot \sin \omega t;$$

$$i_2 = I_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Предположим, что две одинаковые плоские катушки расположены в пространстве так, что их оси взаимно перпендикулярны (рис. 305).

Если такая система катушек питается двухфазным током, то в ней создаются два магнитных потока:

$$\Phi_1 = \Phi_m \cdot \sin \omega t;$$

$$\Phi_2 = \Phi_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Эти магнитные потоки пространственно расположены относительно друг друга под углом 90° , а поэтому результирующий магнитный поток будет равен их геометрической сумме

$$\Phi_0 = \sqrt{(\Phi_m \cdot \sin \omega t)^2 + \Phi_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)^2}.$$

Но

$$\Phi_m \cdot \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = -\Phi_m \cdot \cos \omega t,$$

а поэтому

$$\Phi_0 = \sqrt{(\Phi_m \cdot \sin \omega t)^2 + (-\Phi_m \cdot \cos \omega t)^2},$$

или

$$\Phi_0 = \Phi_m \quad (424)$$

т. е. результирующий магнитный поток двух заданных катушек, питающихся двухфазным током, не зависит от времени и численно равен максимальному магнитному потоку любой из заданных двух катушек.

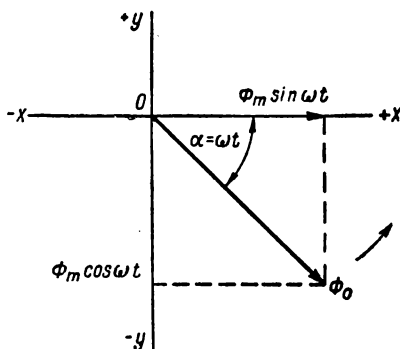
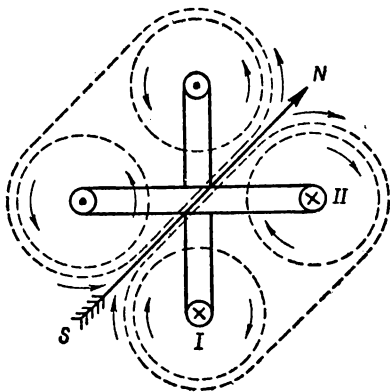


Рис. 305. Две катушки расположены в пространстве под углом 90° одна к другой
Рис. 306. Величина и направление результирующего магнитного потока Φ_0

Теперь определим, какое направление имеет результирующий магнитный поток Φ_0 в пространстве. Из рис. 306 видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{-\Phi_m \cdot \cos \omega t}{\Phi_m \cdot \sin \omega t} = -\operatorname{ctg} \omega t,$$

или, иначе,

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Отсюда находим, что

$$\alpha = \omega t - \frac{\pi}{2},$$

т. е. угол α , составленный вектором Φ_0 с положительной полуосью Ox , изменяется пропорционально времени.

При $t = 0$ $\alpha = -90^\circ$, т. е. вектор Φ_0 совпадает с направлением отрицательной полуоси Oy . В момент, когда $\omega t = 90^\circ$, $\alpha = 90^\circ - 90^\circ = 0$, т. е. в этот момент времени вектор Φ_0 совпадает с направлением положительной полуоси Ox . В момент, когда $\omega t = 180^\circ$, $\alpha = 180^\circ - 90^\circ = 90^\circ$, т. е. в этот момент времени вектор Φ_0 совпадает с направлением положительной полуоси Oy и т. д. Это означает, что вектор Φ_0 результирующего магнитного

поля, сохраняя свое численное значение неизменным, вращается против часовой стрелки с постоянной угловой скоростью ω . Следовательно, вектор Φ_0 за один период тока делает один оборот в системе катушек, питающихся двухфазным током. Магнитное поле подобного рода называется вращающимся магнитным полем двухфазного тока.

Для получения двухфазного вращающегося магнитного поля чаще всего прибегают к системе двух параллельно соединенных катушек, из которых одна обладает большим активным сопротивлением, а другая — большой индуктивностью (рис. 307). В таких катушках токи сдвинуты по фазе примерно на угол $\frac{\pi}{2}$ по отношению друг к другу, и если катушки пространственно расположены под углом $\frac{\pi}{2}$, то в системе их возникает двухфазное вращающееся магнитное поле.

Вращающееся магнитное поле двухфазного тока применяется в некоторых измерительных приборах переменного тока, с которыми мы ознакомимся впоследствии.

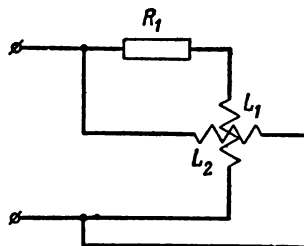


Рис. 307. Схема соединения катушек для получения двухфазного вращающегося магнитного поля

ГЛАВА XXVI

КАТУШКИ И ТРАНСФОРМАТОРЫ СО СТАЛЬНЫМИ СЕРДЕЧНИКАМИ

§ 135. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В электротехнических установках весьма часто приходится встречаться с такими цепями переменного тока, в которых включены катушки со стальными сердечниками, например дроссельные катушки, трансформаторы, автотрансформаторы, разного рода электромагнитные механизмы и т. д.

Электромагнитные процессы в таких катушках сложнее, чем в катушках без стальных сердечников.

Если в катушке без стального сердечника мощность потерь имеется только в активном сопротивлении обмотки, то в катушке со стальным сердечником возникает еще мощность потерь на перемагничивание стали и на вихревые токи, индуцированные в ней.

Если в катушке без стального сердечника существует пропорциональная зависимость между токами и магнитным потоком, то в катушке со стальным сердечником эта зависимость, изображаемая графической циклической кривой перемагничивания стали (петля гистерезиса), не пропорциональная. А это значит, что при синусоидальном напряжении, приложенном к катушке со стальным сердечником, ток в ней в общем случае несинусоидален. Следовательно, катушка со стальным сердечником искажает синусоиду тока.

Если изменять положение стального сердечника в катушке или величину воздушного зазора в нем, то параметры катушки будут изменяться и, в частности, будет резко изменяться индуктивность катушки. А это значит, что при неизменном действующем значении синусоидального напряжения, приложенного к катушке, можно изменять в ней в широких пределах режим путем изменения величины воздушного зазора в сердечнике,

§ 136. МОЩНОСТЬ ПОТЕРЬ НА ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ СТАЛИ

Перемагничивание стали связано с потерей энергии, так как магнитные силы, стремящиеся ориентировать элементарные магнитики в стали, встречают с их стороны некоторое противодействие повороту.

Мощность потерь на перемагничивание стали зависит от величины максимальной магнитной индукции B_m от числа циклов f перемагничивания в секунду, от веса G и сорта стали.

Если максимальная магнитная индукция не превышает $1 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$, то мощность потерь на перемагничивание стали можно определить по формуле

$$P_{\text{пер}} = \left[\alpha \frac{f}{100} B_m + \beta \frac{f}{100} (B_m)^2 \right] G, \quad (425)$$

где $P_{\text{пер}}$ — мощность потерь на перемагничивание стали в ваттах;

G — вес стали в килограммах;

B_m — максимальная магнитная индукция в вольт-секундах на квадратный метр;

f — число циклов перемагничивания в секунду;

α и β — коэффициенты, учитывающие сорт стали, значения которых приведены в табл. 34.

Если максимальная магнитная индукция в стали превышает $1 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$, то мощность потерь на перемагничивание можно определить по формуле

$$P_{\text{пер}} = \sigma \frac{f}{100} B_m^2 G, \quad (426)$$

где σ — коэффициент, учитывающий сорт стали, значение которого приведено в табл. 34.

Таблица 34

Значение коэффициентов, учитывающих сорт стали

Сорт стали	Толщина листа стального сердечника, мм	α	β	σ
Сталь динамная	1,0	0,9	3,5	4,4
	0,5	0,9	3,5	4,4
	0,35	0,9	3,8	4,7
Сталь трансформаторная	0,35	0,3	2,1	2,4
	0,5	0,4	2,6	3,0

Пример 180. Определить мощность потерь на перемагничивание сердечника из трансформаторной стали, если максимальная магнитная индукция в сердечнике $B_m = 1,2 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$, число циклов перемагничивания стали в секунду $f = 50$, вес железа $G = 10 \text{ кг}$ и толщина стальных листов сердечника $d = 0,5 \text{ мм}$.

Решение. По табл. 34 для трансформаторной стали при толщине ее листов $d = 0,5 \text{ мм}$ коэффициент $\sigma = 3,0$.

По формуле (426) находим

$$P_{\text{пер}} = \sigma \frac{f}{100} B_m^2 G = 3 \cdot \frac{50}{100} \cdot 1,2^2 \cdot 10 = 21,6 \text{ вт.}$$

§ 137. МОЩНОСТЬ ПОТЕРЬ НА ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

Если в переменное магнитное поле внести массивный кусок металла, то в нем будет индуцироваться электродвижущая сила и появятся индуцированные токи. Эти токи будут распространяться по массивному проводнику в виде замкнутых вихревых токов.

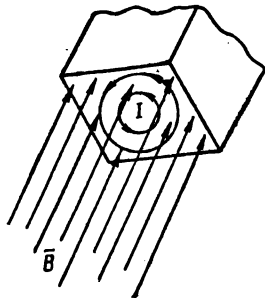


Рис. 308. Вихревые токи, индуцированные в массивном проводнике при $\Delta\Phi > 0$

Согласно правилу Ленца вихревые токи, как токи индуцированные, противодействуют причине, вызвавшей их. Следовательно, направление их таково, что они стремятся противодействовать всем изменениям внешнего магнитного поля, индуцирующего их. На рис. 308 показано направление вихревых токов в массивном проводнике при $\Delta\Phi > 0$, т. е. при возрастании внешнего магнитного потока, пронизывающего проводник.

Так как сопротивление массивного проводника очень мало, то вихревые токи в проводнике могут достигнуть очень большой величины, если не принять мер борьбы с ними.

Вихревые токи чаще всего бывают паразитными, бесполезно поглощающими электрическую энергию, которую они превращают в тепловую энергию.

Одна из самых рациональных мер борьбы с вихревыми токами состоит в расслоении массивных проводников; при этом вредное влияние вихревых токов сводится к минимуму. Сердечники трансформаторов, якорей генераторов обычно собирают из тонких листов железа (стали) толщиной 0,35—0,5 мм, изолированных друг от друга тонким слоем лака или какой-либо другой изоляции. Железные сердечники в катушках очень часто изготовляют из пучка железных прутьев, изолированных друг от друга тем или иным способом. Чтобы вихревые токи были минимальными, поверхности железных листов сердечников располагают параллельно магнитным линиям.

Незначительная примесь кремния в железе (несколько процентов) увеличивает удельное сопротивление железа и этим уменьшает вихревые токи.

В некоторых случаях вихревые токи применяются как токи полезные, например, в металлургии при плавке металлов, при электрическом торможении подвижных частей некоторых измерительных приборов.

Мощность потерь на вихревые токи в расслоенных стальных сердечниках зависит от максимальной магнитной индукции, от числа циклов изменения магнитной индукции в секунду, от толщины стальных листов сердечника и от веса его:

$$P_{в.т} = \sigma_{в.т} \left(\frac{f}{100} B_m \right)^2 G, \quad (427)$$

- где $P_{в.т}$ — мощность потерь на вихревые токи в ваттах;
 B_m — максимальная магнитная индукция в вольт-секундах на квадратный метр;
 f — число циклов изменения магнитной индукции в секунду;
 G — вес железного сердечника в килограммах;
 $\sigma_{в.т}$ — коэффициент, учитывающий материал стального сердечника, величина которого показана в табл. 35.

Т а б л и ц а 35

Значения коэффициента, учитывающего материал сердечника

Сорт стали	Толщина листа, мм	$\sigma_{в.т}$
Сталь динамная	0,35	3,2
	0,5	5,6
	1,0	22,4
Сталь трансформаторная	0,35	0,6
	0,5	1,2

Пример 181. Определить мощность потерь на вихревые токи в сердечнике из трансформаторной стали весом $G = 10$ кг, если переменная магнитная индукция при своих изменениях в стали достигает величины $B_m = 1,2 \frac{в-сек}{м^2}$, число циклов изменения магнитной индукции в секунду $f = 50$ и толщина листов трансформаторной стали равна 0,5 мм.

Решение. Для трансформаторной стали при толщине листов 0,5 мм по табл. 35 коэффициент $\sigma_{в.т} = 1,2$.

По формуле (427) находим величину мощности потерь на вихревые токи

$$P_{в.т} = \sigma_{в.т} \left(\frac{f}{100} B_m \right)^2 G = 1,2 \left(\frac{50}{100} \cdot 1,2 \right)^2 \cdot 10 = 4,32 \text{ вт.}$$

§ 138. КАТУШКА СО СТАЛЬНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Допустим, что к катушке со стальным замкнутым сердечником приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ (рис. 309). Исследуем режим в этой катушке, считая вначале активное сопротивление обмотки катушки и магнитный поток рассеяния в системе катушки практически настолько малыми, что ими можно пренебречь.

Переменное синусоидальное напряжение, приложенное к катушке, создает в ней переменный ток, в общем случае не синусоидальный. Так как активное сопротивление обмотки катушки равно нулю ($r_m = 0$), то все напряжение, приложенное к катушке, расходуется только в ее индуктивном сопротивлении. Значит, это напряжение полностью компенсируется электродвижущей силой самоиндукции, возникшей в катушке в результате изменений магнитного потока, создаваемого переменным током. Следовательно, в любой момент времени мгновенное значение напряжения, приложенного к катушке, должно быть численно равным и противоположным по знаку электродвижущей силе самоиндукции:

$$e_L = -u = -U_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

На основании последнего равенства можно сделать вывод, что при синусоидальном напряжении, приложенном к катушке со стальным сердечником, электродвижущая сила самоиндукции в ней является величиной синусоидальной, отстающей от напряжения по фазе на угол π .

Но электродвижущая сила самоиндукции в катушке пропорциональна скорости изменения магнитного поля в этой катушке, а поэтому, если электродвижущая сила самоиндукции синусоидальна, то и магнитный поток, создающий ее, также должен изменяться по синусоидальному закону во времени и в то же время должен опережать ее по фазе на угол $\frac{\pi}{2}$:

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t.$$

На рис. 310 приведены векторные и развернутые диаграммы синусоидальных напряжений, электродвижущей силы самоиндукции и магнитного потока для катушки со стальным сердечником.

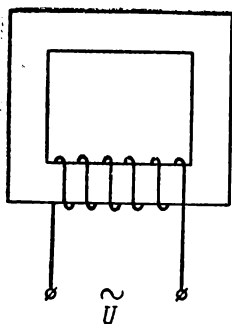


Рис. 309. Катушка со стальным сердечником

Установлено, что максимальная величина магнитного потока Φ_m в катушке зависит от величины действующего значения синусоидального напряжения U , приложенного к катушке, от частоты ее f и от числа витков ω катушки:

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44f\omega}. \quad (428)$$

Пример 182. Определить максимальную величину магнитного потока Φ_m (амплитуду магнитного потока) в катушке со стальным сердечником, если действующее значение синусоидального напряжения, приложенного к ней, $U = 220$ в, частота ее $f = 50$ гц и число витков $\omega = 1000$.

Решение. Применяя формулу (428), находим

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44f\omega} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 1000} = 0,001 \text{ в-сек.}$$

Теперь выясним, каким же должен быть ток в катушке, чтобы он мог создавать в ее сердечнике синусоидальный магнитный поток $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$.

Как известно, между током и магнитным потоком в катушке со стальным сердечником существует нелинейная зависимость, т. е. магнитный поток в ней изменяется не пропорционально току, а поэтому при наличии в ней синусоидального магнитного потока ток в ней должен быть несинусоидальным.

Для построения графика зависимости тока от времени для катушки со стальным сердечником необходимо воспользоваться графиком, выражающим зависимость между током и магнитным потоком, т. е. кривой, аналогичной кривой перемагничивания стали.

На рис. 311 с левой его стороны приведен график зависимости магнитного потока Φ от тока i , а с правой стороны приведена синусоида магнитного потока Φ , выражающая зависимость его от времени. Покажем, как с помощью этих двух графиков можно построить график зависимости тока i от времени.

На левой стороне рис. 311 находим, что магнитному потоку $\Phi = \Phi_1 = 0$ соответствует ток i_1 , магнитному потоку Φ_2 — ток i_2 , магнитному потоку $\Phi_3 = \Phi_m$ — ток $i_3 = I_m$, магнитному потоку Φ_4 — ток $i_4 = 0$, магнитному потоку $\Phi_5 = 0$ — ток $-i_5$ и т. д. Затем на правой стороне рис. 311, где нанесена синусоида магнитного потока Φ , для каждого значения магнитного потока Φ откладываем на перпендикулярах к оси времени величины тока i , соответствующие величинам данных магнитных потоков. Например, для магнитного потока $\Phi = 0$ отметим на вертикальной оси ток i_1 , для магнитного потока Φ_2 — ток i_2 , для Φ_m — ток I_m и т. д. Затем по полученным для кривой тока точ-

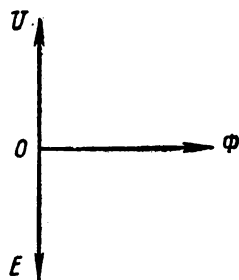


Рис. 310. Векторные и развернутые диаграммы напряжения, магнитного потока и электродвижущей силы самоиндукции для катушки со стальным сердечником, активное сопротивление обмотки которой равно нулю

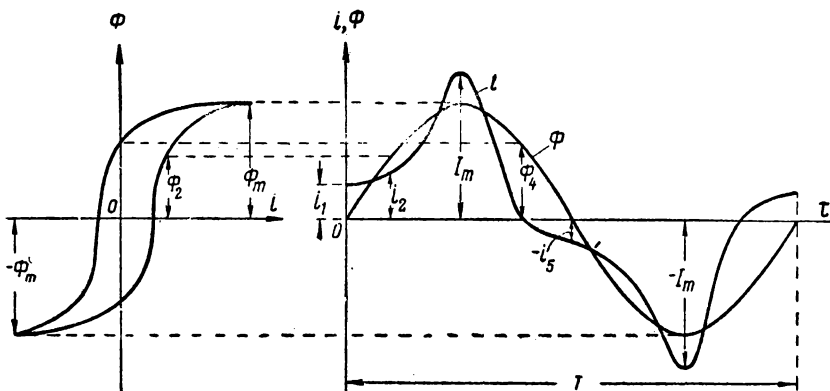


Рис. 311. Построение графика несинусоидального тока для катушки со стальным сердечником с помощью циклической кривой перемагничивания стали

кам сможем построить график зависимости тока от времени, так как для каждого мгновенного значения магнитного потока нам известно соответствующее ему мгновенное значение тока, взятое из графика зависимости магнитного потока от тока (левая часть рис. 311). Из графика тока мы видим, что ток i и магнитный поток Φ достигают одновременно своих максимальных значений, но нулевых значений они достигают не одновременно — ток i достигает нулевого значения несколько раньше, чем магнитный поток Φ . Это объясняется отставанием намагничивания стали от намагничивающей силы, или, иначе сказать, явлением гистерезиса.

Итак, ток в катушке со стальным сердечником, к которой приложено синусоидальное напряжение, в общем случае несинусоидален. Следовательно, катушка со стальным сердечником искажает синусоиду тока, и это искажение при всех прочих равных условиях будет тем сильнее, чем до большего магнитного насыщения будет доводиться стальной сердечник при его перемагничивании.

Исследование режима в катушке со стальным сердечником при наличии в ней несинусоидального тока связано с известными затруднениями. Для облегчения этой задачи обычно переходят от несинусоидального тока к эквивалентному синусоидальному току катушки.

Синусоидальным током, эквивалентным данному несинусоидальному периодическому току, называют такой ток, который имеет одинаковое с ним действующее значение, одинаковую частоту и развивает одинаковую с ним активную мощность в данной цепи.

Эквивалентный синусоидальный ток для катушки со сталью можно найти по двум его взаимно перпендикулярным составляющим — намагничивающей I_μ и активной I_a .

Намагничивающая составляющая тока создает синусоидальный магнитный поток Φ . Она является синусоидальной величиной, совпадающей по фазе с создаваемым ею магнитным потоком Φ . Ее определяют следующим образом:

1) по заданному действующему значению U синусоидального напряжения, приложенного к катушке, определяют максимальное значение Φ_m магнитного потока в сердечнике катушки по формуле (428)

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44f\omega};$$

2) затем по основной кривой намагничивания заданного сорта стали (рис. 312) определяют максимальные ампер-витки AW_m , соответствующие полученному максимальному магнитному потоку Φ_m ;

3) по полученным максимальным ампер-виткам AW_m находят действующее значение намагничивающей составляющей тока I_μ по формуле

$$I_\mu = \frac{AW_m}{\sqrt{2}\omega}, \quad (429)$$

где ω — число витков катушки.

Активная составляющая тока I_a развивает мощность, необходимую для покрытия мощности потерь в стали на перемагничивание и вихревые токи. Она также является синусоидальной величиной, опережающей по фазе магнитный поток Φ , а следовательно, и намагничивающую составляющую тока I_μ на угол $\frac{\pi}{2}$. Следовательно, в данном случае, когда активное сопротивление обмотки катушки практически равно нулю ($r_m = 0$), активная составляющая тока I_a совпадает по фазе с напряжением U , приложенным к катушке. Величину активной составляющей тока I_a можно определить по формуле

$$I_a = \frac{P_a}{U}, \quad (430)$$

где P_a — мощность потерь в ваттах на перемагничивание стали и на вихревые токи, ко-

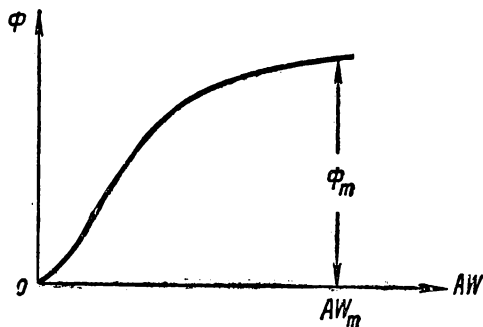


Рис. 312. График зависимости магнитного потока Φ от ампер-витков катушки

торая может быть рассчитана по формулам (425) и (426) или измерена ваттметром;

U — действующее значение напряжения, приложенного к катушке, в вольтах;

I_a — активная составляющая тока в амперах.

Определив намагничивающую составляющую тока I_μ и активную составляющую его I_a , можно найти и действующее значение эквивалентного синусоидального тока по формуле

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_\mu^2}, \quad (431)$$

т. е. действующее значение эквивалентного синусоидального тока в катушке со стальным сердечником равняется корню квадратному из суммы квадратов активной I_a и намагничивающей I_μ составляющих его.

Если активное сопротивление r_m обмотки катушки таково, что им пренебречь нельзя, то часть напряжения, приложенного к катушке, будет затрачена в этом сопротивлении, а другая часть его будет затрачена на преодоление электродвижущей силы самоиндукции.

В этом случае в формуле (428) для определения максимального магнитного потока Φ_m надо вместо напряжения U , приложенного к катушке, взять часть его U_L , равную электродвижущей силе самоиндукции в катушке:

$$\Phi_m = \frac{U_L}{4,44fw}.$$

Формула (430) для определения активной составляющей тока I_a в этом случае также несколько видоизменяется:

$$I_a = \frac{P_{ст}}{U_L},$$

где U_L — та часть напряжения, которая компенсирует электродвижущую силу самоиндукции.

Надо заметить, что в рассматриваемом случае, когда $r_m \neq 0$, активная составляющая тока I_a будет совпадать по фазе не с полным напряжением U , приложенным к катушке, а с напряжением U_L , которое, как и активная составляющая тока I_a , опережает по фазе магнитный поток Φ на угол $\frac{\pi}{2}$. Чем больше мощность потерь на перемагничивание и вихревые токи в стали катушки, тем больше активная составляющая тока.

На рис. 313 показана векторная диаграмма токов и напряжений катушки со стальным сердечником, порядок построения которой сводится к следующему. Откладываем вектор магнитного потока Φ в некотором произвольном направлении, напри-

мер в горизонтальном и вправо. Намагничивающая составляющая тока I_μ , создающая этот магнитный поток, совпадает с ним по фазе, а поэтому откладываем вектор I_μ по направлению вектора магнитного потока Φ . Индуцированная электродвижущая сила самоиндукции в катушке отстает по фазе от магнитного потока на угол $\frac{\pi}{2}$, а поэтому вектор электродвижущей силы самоиндукции E_L отложим вниз под углом $\frac{\pi}{2}$ к вектору магнитного потока Φ . Та часть приложенного к катушке

напряжения U_L , которая компенсирует электродвижущую силу самоиндукции, находится с ней в противофазе, а поэтому вектор U_L отложим вверх перпендикулярно вектору магнитного потока Φ . Активная составляющая тока I_a , обусловленная мощностью потерь на вихревые токи и перемагничивание стали катушки, совпадает по фазе с напряжением U_L , а поэтому вектор I_a проводим в направлении вектора напряжения U_L . Результирующий ток I — эквивалентный синусоидальный ток катушки — равен геометрической сумме тока намагничения I_μ и активной составляющей тока I_a , а поэтому вектор тока I определим путем геометрического сложения векторов тока I_μ и I_a . Та часть напряжения U_a , которая составляет падение напряжения в активном сопротивлении обмотки катушки, совпадает по фазе с током I катушки, а поэтому вектор напряжения U_a прикладываем началом к концу вектора U_L и проводим параллельно вектору тока I . Напряжение, приложенное к катушке, равно геометрической сумме падений напряжений U_L и U_a . Сложив геометрически векторы U_L и U_a , найдем вектор напряжения U , приложенного к катушке.

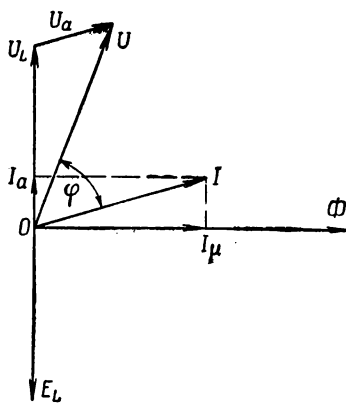
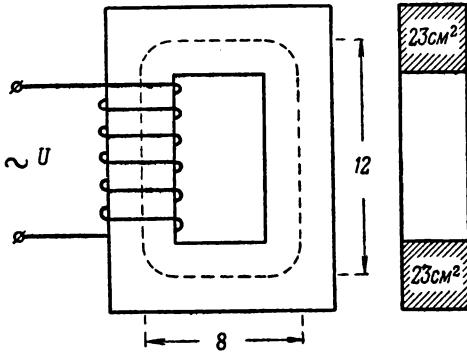


Рис. 313. Векторная диаграмма токов и напряжений для катушки со стальным сердечником

Из векторной диаграммы видно, что угол сдвига фаз напряжения U и эквивалентного синусоидального тока I в катушке в общем случае меньше $\frac{\pi}{2}$. Это и понятно, так как в катушке происходят потери энергии на необратимые процессы — в активном сопротивлении обмотки катушки и в стали на вихревые токи и на перемагничивание. Чем больше эти потери, тем меньше угол φ и тем, следовательно, больше мощность потерь в катушке.

Мощность потерь на перемагничивание и вихревые токи в катушке со сталью зависит от максимальной магнитной

индукции B_m в стали, от частоты f тока, от сорта стали и веса. Величину этой мощности можно рассчитать по формулам (425) и (427). Величина максимальной магнитной индукции B_m в стали катушки зависит от величины приложенного напряжения: чем больше это напряжение, тем больше магнитный поток Φ в стали, максимальная магнитная индукция B_m в ней, мощность потерь на перемагничивание и вихревые токи.



Полное сопротивление Z катушки можно определить, исходя из формулы закона Ома

$$Z = \frac{U}{I}. \quad (432)$$

Эквивалентное активное сопротивление R_s катушки можно определить, исходя из активной мощности P_a , расходуемой в катушке:

Рис. 314. Катушка с замкнутым стальным сердечником

$$R_s = \frac{P_a}{I^2} = \frac{P_{ст}}{I^2} + r_m, \quad (433)$$

где $P_{ст}$ — мощность потерь в стали на перемагничивание и вихревые токи;

r_m — активное сопротивление обмотки катушки.

Зная полное сопротивление Z и эквивалентное активное сопротивление R_s , можно определить реактивное сопротивление x_L :

$$x_L = \sqrt{Z^2 - R_s^2},$$

а отсюда — и индуктивность L катушки:

$$L = \frac{x_L}{\omega}, \quad (434)$$

где L — индуктивность катушки в генри.

Пример 183. Требуется определить режим в катушке со стальным сердечником (рис. 314), если к ней приложено синусоидальное напряжение, действующее значение которого $U = 50$ в и частота $f = 50$ гц. Катушка имеет число витков $\omega = 100$. Сердечник катушки набран из листовой электротехнической стали и имеет площадь поперечного сечения $S = 23$ см². Активное сопротивление обмотки катушки $r_m = 1$ ом. Все размеры, показанные на рис. 314, даны в сантиметрах. Воздушного зазора сердечник не имеет. Магнитным рассеянием в катушке пренебрегаем.

Решение. Поскольку активное сопротивление обмотки катушки относительно мало, полагаем, что все напряжение, приложенное к катушке, компенсируется электродвижущей силой самоиндукции, т. е.

$$U_L \approx U = 50 \text{ в.}$$

Максимальный магнитный поток в сердечнике катушки определим по формуле

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44fw} = \frac{50}{4,44 \cdot 50 \cdot 100} \approx 0,0023 \text{ в-сек.}$$

Величина максимальной магнитной индукции в сердечнике катушки равна

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S} = \frac{0,0023}{0,0023} = 1,0 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}.$$

По кривой намагничивания находим удельные ампер-витки (напряженность магнитного поля), которые для максимальной магнитной индукции

$$B_m = 1 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2} \text{ равны } 300 \frac{\text{а-в}}{\text{м}}.$$

Полные ампер-витки (магнитодвижущая сила), необходимые для создания данного магнитного режима в стальном сердечнике катушки, равны

$$AW_{\text{ст}} = AW_{\text{ср}} = 300 \cdot 0,4 = 120 \text{ а-в,}$$

где $l_{\text{ср}}$ — длина средней магнитной линии в стали.

Отсюда находим максимальное значение намагничивающей составляющей эквивалентного синусоидального тока:

$$I_{\mu m} = \frac{AW_{\text{ст}}}{w} = \frac{120}{100} = 1,2 \text{ а.}$$

Намагничивающая составляющая эквивалентного синусоидального тока равна

$$I_{\mu} = \frac{I_{\mu m}}{\sqrt{2}} = \frac{1,2}{1,41} = 0,84 \text{ а.}$$

Определяем вес стального сердечника, принимая удельный вес стали равным $7,8 \frac{\text{кг}}{\text{дм}^3}$:

$$G = Sl \cdot 7,8 = 0,23 \cdot 4 \cdot 7,8 = 7,16 \text{ кг.}$$

Находим мощность потерь на перемагничивание стали по формуле

$$P_{\text{пер}} = \sigma_{\text{пер}} \frac{f}{100} B_m^2 G = 3 \cdot \frac{50}{100} \cdot 1^2 \cdot 7,16 = 10,74 \text{ вт,}$$

где $\sigma_{\text{пер}} = 3$.

Находим мощность потерь на вихревые токи в стали по формуле

$$P_{\text{в.т}} = \sigma_{\text{в.т}} \left(\frac{f}{100} B_m \right)^2 G = 1,2 \left(\frac{50}{100} \cdot 1 \right)^2 \cdot 7,16 = 2,15 \text{ вт.}$$

где $\sigma_{\text{в.т}} = 1,2$.

Находим общую мощность потерь в стали на перемагничивание и вихревые токи:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{пер}} + P_{\text{в.т}} = 10,74 + 2,15 \approx 12,9 \text{ вт.}$$

Теперь определим активную составляющую эквивалентного синусоидального тока по формуле

$$I_a = \frac{P_{ст}}{U_L} = \frac{12,9}{50} \approx 0,26 \text{ а.}$$

Эквивалентный синусоидальный ток катушки

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{0,26^2 + 0,84^2} = 0,88 \text{ а.}$$

Падение напряжения в активном сопротивлении обмотки катушки

$$U_a = I r_m = 0,88 \cdot 1 = 0,88 \text{ в,}$$

т. е. оно имеет такую величину, которой можно пренебречь.

Активная мощность, развиваемая источником электрической энергии в катушке, равна

$$P_a = P_{ст} + I^2 r_m = 12,9 + 0,88^2 \cdot 1 = 13,7 \text{ вт.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P_a}{UI} = \frac{13,7}{50 \cdot 0,88} = 0,314.$$

Полное сопротивление катушки

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{50}{0,88} = 57 \text{ ом.}$$

Эквивалентное активное сопротивление катушки

$$R_a = \frac{P_a}{I^2} = \frac{13,7}{0,88^2} = 17,7 \text{ ом.}$$

Индуктивное сопротивление катушки

$$x_L = \sqrt{Z^2 - R_a^2} = \sqrt{57^2 - 17,7^2} = 54 \text{ ом.}$$

Индуктивность катушки

$$L = \frac{x_L}{\omega} = \frac{54}{314} = 0,172 \text{ гн.}$$

Очень часто на практике применяются катушки, стальные сердечники которых имеют воздушные зазоры. Такие катушки обычно называют дроссельными. Если при неизменном действующем значении напряжения, приложенного к дроссельной катушке, изменять величину воздушного зазора в стальном сердечнике, то изменится магнитное сопротивление магнитопровода катушки и ее индуктивность. На рис. 315 показан график зависимости индуктивности дроссельной катушки от воздушного зазора ее сердечника. Из этого графика видно, что с увеличением воздушного зазора индуктивность катушки падает вначале более резко, а потом замедленно. В соответствии с этим изменяется и реактивное сопротивление катушки, что в свою очередь приводит к изменению тока в ее обмотке. Следовательно, регулируя воздушный зазор в сердечнике катушки, можно регули-

ровать ток в ней, сохраняя неизменным действующее значение напряжения на ее зажимах.

На рис. 316 показан один из типичных дросселей, применяемых в радиотехнических схемах. Сердечник дросселя изготовлен из специальной трансформаторной стали или из мягкого листового железа толщиной менее одного миллиметра. Отдельные листы сердечника изолированы друг от друга тонкой папиросной бумагой или слоем шеллачного спиртового лака, чтобы свести к минимуму потери на вихревые токи. Каркас катушки склеивается из электрокартона или

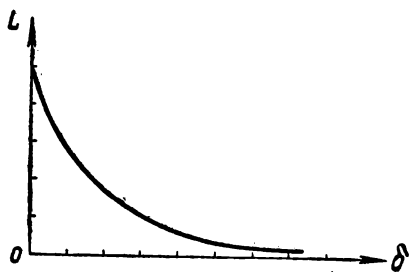


Рис. 315. График зависимости индуктивности дроссельной катушки от воздушного зазора ее сердечника

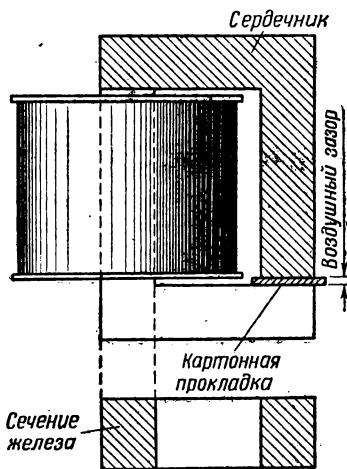


Рис. 316. Внешний вид дроссельной катушки, применяемой в радиотехнике

картона. Щеки каркаса делаются из толстого картона. Обмотка катушки кладется ровными слоями, и при этом между несколькими рядами проволоки размещается прокладка из электрокартона, пропитанного шеллачным лаком. Это делается для улучшения изоляции обмотки и предохранения витков от пробоя высоким напряжением.

Воздушный зазор в сердечнике катушки обычно заполняется картонной прокладкой, толщина которой колеблется от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Крепление нескольких листов сердечника производится при помощи болтов, пропускаемых через отверстия в пластинах, или же при помощи деревянных пластин, стягиваемых шурупами.

Потери энергии в катушках со сталью невелики, а поэтому их весьма выгодно применять в цепях переменного тока вместо реостатов для поглощения излишнего напряжения.

§ 139. ОБЩЕЕ ПОНЯТИЕ О ТРАНСФОРМАТОРАХ

Трансформатором называется электротехническое устройство (аппарат), преобразующее переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

Трансформаторы играют важную роль в электротехнике и, в частности, в технике связи. Например, мощные повышающие трансформаторы дают возможность передавать электрическую

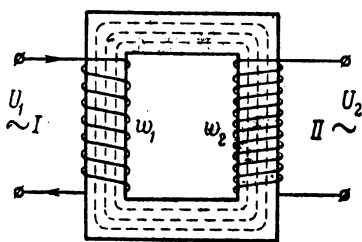


Рис. 317. Схема трансформатора

энергию с малыми потерями на очень большие расстояния. С помощью понижающих трансформаторов эту энергию можно преобразовать для использования ее многочисленными потребителями переменного тока низкого напряжения. Трансформаторы — важные элементы радиоцепей, без которых немыслима работа радиотехнических устройств и вообще всех электрических средств связи.

Советская электропромышленность освоила полностью выпуск всех типов трансформаторов, необходимых для удовлетворения нужд электротехники. Советские конструкторы разработали оригинальные конструкции трансформаторов высокого напряжения, предназначенных для линий передачи электрической энергии на сверхдальние расстояния. Освоено производство высококачественных трансформаторов для ртутных преобразовательных подстанций, мощных трансформаторов, применяемых в электротермии, и ряда иных типов трансформаторов, предназначенных для обслуживания разного рода электротехнических устройств.

Приоритет изобретения трансформатора принадлежит замечательному русскому изобретателю П. Н. Яблочкову.

В 1876 г. П. Н. Яблочков выдвинул идею трансформации переменного тока, а спустя шесть лет, в 1882 г., первый трансформатор Яблочкова — прототип современных трансформаторов переменного тока — демонстрировался на электротехнической выставке в Петербурге и получил всеобщее признание.

В том же 1882 г. на московской промышленной выставке другой русский изобретатель, лаборант физической лаборатории Московского университета И. Ф. Усагин демонстрировал трансформатор переменного тока своей конструкции, за что получил от Комитета выставки диплом с надписью «За успешные опыты электрического освещения через посредство отдельной индукции и в поощрение дальнейшей разработке этой metody».

Простейший трансформатор состоит из замкнутого стального сердечника, собранного из листовой стали, на котором размещены две обмотки, индуктивно связанные друг с другом (рис. 317). Одна из этих обмоток, имеющая число витков ω_1 , подключается к источнику электрической энергии с переменным напряжением. Она называется первичной обмоткой транс-

форматора. Другая обмотка, имеющая число витков ω_2 , называется вторичной.

Назначение первичной обмотки трансформатора — получать электрическую энергию от генератора и передавать ее во вторичную обмотку. Назначение же последней — преобразовывать (трансформировать) напряжение (повышать или понижать) первичной обмотки и при заданном номинальном напряжении питать потребители электрической энергией, получаемой от первичной обмотки.

Различают два основных режима работы трансформатора: при холостом ходе и при нагрузке. Рассмотрим эти два режима.

§ 140. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ХОЛОСТОМ ХОДЕ

Если концы вторичной обмотки трансформатора оставить разомкнутыми, то трансформатор будет работать без нагрузки, или, иначе говоря, будет находиться в режиме холостого хода. Этот режим мало отличается от режима работы обычной катушки со стальным сердечником.

Под влиянием переменного синусоидального напряжения $u_1 = U_{1m} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$, приложенного к первичной обмотке трансформатора, в ней в общем случае возникнет какой-то периодический несинусоидальный ток, действующее значение которого равно I .

Если активное сопротивление первичной обмотки трансформатора относительно мало, что бывает довольно часто на практике, то переменный ток создает в стальном сердечнике такой синусоидальный магнитный поток $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$, при котором в первичной обмотке индуцируется электродвижущая сила самоиндукции, уравновешивающая полностью приложенное к этой обмотке напряжение:

$$e_1 = -U_{1m} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U_{1m} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

или

$$\bar{U}_1 = -\bar{E}_1,$$

где U_1 — действующее значение напряжения, приложенного к первичной обмотке;

E_1 — действующее значение электродвижущей силы самоиндукции в первичной обмотке.

Одновременно магнитный поток $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$ пронизывает и витки вторичной обмотки трансформатора, где в соответствии с этим индуцируется электродвижущая сила взаимной индукции E_2 .

Так как электродвижущие силы E_1 и E_2 индуцируются одним и тем же магнитным потоком, то

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2},$$

т. е. индуцированные электродвижущие силы в первичной и вторичной обмотках трансформатора пропорциональны числу витков этих обмоток.

Но так как при холостом ходе трансформатора напряжение U_2 на разомкнутых зажимах вторичной обмотки равно электродвижущей силе E_2 , а напряжение U_1 , приложенное к первичной обмотке, практически равно электродвижущей силе E_1 , то можем положить, что

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k. \quad (435)$$

Приняв во внимание, что в мощных трансформаторах падение напряжения в обмотках относительно мало при нагрузке, можно считать, что равенство (435) справедливо не только при холостом ходе трансформатора, но и при его нагрузке.

Отношение первичного напряжения U_1 к вторичному U_2 при холостом ходе трансформатора, равное отношению числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной, называется коэффициентом трансформации k .

Если коэффициент трансформации $k < 1$, то трансформатор является повышающим, так как вторичное напряжение U_2 больше первичного U_1 ($U_2 > U_1$ при $k < 1$). Наоборот, если коэффициент трансформации $k > 1$, то трансформатор является понижающим, так как в этом случае вторичное напряжение U_2 меньше первичного U_1 ($U_2 < U_1$ при $k > 1$).

Пример 184. К первичной обмотке трансформатора подано напряжение, действующее значение которого равно $U_1 = 25$ в. Число витков первичной обмотки $w_1 = 250$, а вторичной $w_2 = 2000$. Определить коэффициент трансформации трансформатора и напряжение на его зажимах при холостом ходе.

Решение. Коэффициент трансформации равен

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{250}{2000} = 0,125,$$

т. е. трансформатор является повышающим.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе равно

$$U_2 = \frac{U_1 w_2}{w_1} = \frac{U_1}{k} = \frac{25}{0,125} = 200 \text{ в.}$$

Величина магнитного потока в сердечнике трансформатора зависит от величины действующего значения напряжения U_1 , приложенного к первичной обмотке трансформатора. Максимальное значение магнитного потока определяется, как и для обычной катушки со стальным сердечником, по формуле (428)

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4,44 f w_1}.$$

Пример 185. Определить максимальное значение магнитного потока в сердечнике трансформатора, если напряжение, приложенное к его первичной

обмотке, $U_1 = 125$ в, частота $f = 50$ гц и число витков первичной обмотки $w_1 = 500$.

Решение. По формуле (428) находим

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4,44fw_1} = \frac{125}{4,44 \cdot 50 \cdot 500} = 1,125 \cdot 10^{-3} \text{ в-сек.}$$

Магнитный поток при холостом ходе трансформатора создается током его первичной обмотки, называемым током холостого хода I_0 трансформатора. Величину его можно определить по намагничивающей и активной составляющим, как и для обычной катушки со стальным сердечником, применяя формулы (429) и (430).

Ток холостого хода трансформатора обычно составляет несколько процентов номинального рабочего тока первичной его цепи.

Чтобы уменьшить ток холостого хода, обычно в качестве материала для сердечников трансформатора применяют трансформаторную сталь, обладающую большой магнитной проницаемостью. Стальной сердечник рассчитывается обычно так, чтобы он не работал в режиме магнитного насыщения, поскольку в этом случае возникает большая мощность потерь стали из-за большой величины магнитной индукции и, кроме того, увеличивается ток холостого хода из-за относительно малой магнитной проницаемости сердечника.

На рис. 318 приведена векторная диаграмма токов и напряжений при холостом ходе трансформатора для случая, когда магнитным рассеянием в трансформаторе можно пренебречь.

На диаграмме показаны:

Φ — вектор магнитного потока трансформатора;

E_1 — электродвижущая сила самоиндукции в первичной обмотке трансформатора;

E_2 — электродвижущая сила взаимной индукции во вторичной обмотке трансформатора;

I_0 — ток холостого хода трансформатора;

U_{a1} — та часть первичного напряжения, которая компенсирует электродвижущую силу самоиндукции E_1 в первичной обмотке;

U_a' — падение напряжения в активном сопротивлении первичной обмотки трансформатора;

U_1 — напряжение, приложенное к первичной обмотке;

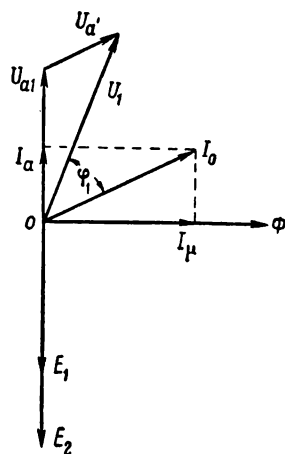


Рис. 318. Векторная диаграмма токов и напряжений при холостом ходе трансформатора

φ_1 — сдвиг фаз тока холостого хода I_0 и первичного напряжения U_1 .

Так как ток холостого хода трансформатора относительно мал, то мощность потерь в активном сопротивлении первичной обмотки обычно мала. Следовательно, мощность потерь холостого хода трансформатора складывается главным образом из потерь на перемагничивание и на вихревые токи в стальном сердечнике:

$$P_0 = U_1 I_0 \cdot \cos \varphi_0, \quad (436)$$

где P_0 — мощность потерь в трансформаторе при холостом ходе в ваттах;

U_1 — номинальное напряжение трансформатора в вольтах при холостом ходе трансформатора;

I_0 — ток холостого хода трансформатора в амперах;

$\cos \varphi_0$ — коэффициент мощности трансформатора при холостом ходе.

§ 141. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НАГРУЗКЕ

Допустим, что к зажимам вторичной обмотки трансформатора подключен потребитель, обладающий полным сопротивлением Z . В результате этого во вторичной цепи возникнет ток I_2 , величину которого можно определить по формуле закона Ома

$$I_2 = \frac{U_2}{Z},$$

где U_2 — напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора.

Вполне очевидно, что напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки трансформатора будет меньше, чем электродвижущая сила взаимной индукции \bar{E}_2 , из-за падения напряжения во вторичной обмотке трансформатора:

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - \bar{I}_2 Z_2, \quad (437)$$

т. е. напряжение на зажимах вторичной обмотки нагруженного трансформатора равняется геометрической разности электродвижущей силы взаимной индукции \bar{E}_2 и падения напряжения $\bar{I}_2 Z_2$ во вторичной обмотке.

Ток I_2 , возникший во вторичной цепи под действием электродвижущей силы взаимной индукции, согласно правилу Ленца создает собственный магнитный поток в сердечнике трансформатора, направленный навстречу основному магнитному потоку, создаваемому током I_1 первичной обмотки.

Следовательно, при переводе трансформатора с холостого хода на нагрузку результирующий магнитный поток в сердечнике трансформатора в первый момент несколько снижается

из-за размагничивающего действия ампер-витков $\omega_2 I_2$ вторичной обмотки. Однако это приводит к тому, что электродвижущая сила самоиндукции E_1 первичной обмотки уменьшается, соответственно уменьшаются индуктивное и полное сопротивления первичной обмотки и возрастает ток I_1 . Этот ток возрастает до такой величины, при которой результирующий магнитный поток вновь становится таким же, как и при холостом ходе трансформатора.

Итак, ток I_1 в первичной обмотке нагруженного трансформатора увеличивается по сравнению с током холостого хода I_0 ровно настолько, чтобы скомпенсировать размагничивающие ампер-витки вторичной обмотки и сохранить прежнее значение магнитного потока, равное потоку холостого хода. Наоборот, если трансформатор будет разгружаться (будет уменьшаться ток I_2), то в соответствии с этим будут уменьшаться размагничивающие ампер-витки $\omega_2 I_2$, что приведет к увеличению результирующего магнитного потока в сердечнике трансформатора. В соответствии же с этим возрастет электродвижущая сила самоиндукции в первичной катушке, увеличатся индуктивное и полное сопротивления в ней, что приведет к снижению тока I_1 в первичной обмотке. Этот ток будет уменьшаться до тех пор, пока результирующий магнитный поток в трансформаторе не станет вновь равным магнитному потоку холостого хода.

Следовательно, **всякое изменение нагрузки (тока I_2) трансформатора приводит к такому изменению тока I_1 в первичной цепи, при котором результирующий магнитный поток в сердечнике трансформатора остается равным магнитному потоку холостого хода.**

Для сохранения постоянства результирующего магнитного потока в сердечнике трансформатора в режимах от холостого хода до полной нагрузки его необходимо такое соотношение между ампер-витками первичной и вторичной обмоток, чтобы их геометрическая сумма равнялась ампер-виткам первичной обмотки при холостом ходе трансформатора, т. е.

$$\overline{I_1 \omega_1} + (\overline{I_2 \omega_2}) = \overline{I_0 \omega_1} = \text{const}, \quad (438)$$

где $I_1 \omega_1$ — ампер-витки первичной обмотки трансформатора при нагрузке;

$I_2 \omega_2$ — размагничивающие ампер-витки вторичной обмотки трансформатора;

$I_0 \omega_1$ — ампер-витки первичной обмотки трансформатора при холостом ходе.

Разделив все члены равенства (438) на число витков ω_1 , получим следующее соотношение токов в трансформаторе:

$$\overline{I_1} = \overline{I_0} + \left(-\frac{\omega_2}{\omega_1} \overline{I_2} \right) = \overline{I_0} + I_1, \quad (439)$$

т. е. ток I_1 в первичной обмотке трансформатора равняется геометрической сумме двух токов — тока холостого хода I_0 трансформатора и тока $I'_1 = -\frac{w_2}{w_1} I_2$, который компенсирует размагничивающее действие тока вторичной обмотки трансформатора.

Ток I'_1 находится в противофазе с током I_2 , т. е. сдвинут по фазе относительно него на угол 180° , и численно отличается от него в $\frac{w_2}{w_1}$ раз.

Так как ток холостого хода трансформатора мал по сравнению с номинальным рабочим током I_1 первичной цепи трансформатора, то в уравнении (439) с достаточной для практики точностью можно считать, что

$$|I_1| \approx \left| \frac{w_2}{w_1} I_2 \right|,$$

или, иначе,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}, \quad (440)$$

т. е. токи первичной и вторичной обмоток трансформатора обратно пропорциональны числам витков этих обмоток.

Надо все же помнить, что пренебрежение величиной тока холостого хода I_0 приводит нас к равенству

$$I_1 w_1 = I_2 w_2,$$

которое выражает только приближенное равновесие ампер-витков первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Пример 186. Определить ток в первичной обмотке трансформатора, если во вторичной цепи его имеется ток $I_2 = 5$ а, число витков первичной обмотки $w_1 = 300$, а вторичной $w_2 = 30$.

Решение. Применяя формулу (440), находим

$$I_1 = \frac{I_2 w_2}{w_1} = \frac{5 \cdot 30}{300} = 0,5 \text{ а.}$$

Мощность, развиваемая источником электрической энергии в первичной цепи трансформатора, равна

$$P_1 = U_1 I_1 \cdot \cos \varphi_1.$$

Мощность, развиваемая во вторичной цепи трансформатора, равна

$$P_2 = U_2 I_2 \cdot \cos \varphi_2.$$

Мощность P_1 , развиваемая источником электрической энергии, складывается из мощности P_2 , передаваемой из первичной цепи во вторичную, мощности P_m потерь в активном сопротивлении

первичной обмотки и мощности $P_{ст}$ потерь в стальном сердечнике на перемангничивание и вихревые токи:

$$P_1 = P_2 + P_m + P_{ст}.$$

Мощности P_m и $P_{ст}$ потерь в первичной цепи трансформатора относительно малы. Например, в мощных трансформаторах они составляют не более одного процента. Поэтому, если ими практически пренебречь, то будем иметь следующее соотношение мощностей в трансформаторе: $P_1 \approx P_2$, или, иначе,

$$U_1 I_1 \cdot \cos \varphi_1 \approx U_2 I_2 \cdot \cos \varphi_2. \quad (441)$$

Но так как в этом случае

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = k, \text{ или } U_1 I_1 = U_2 I_2,$$

то на основании равенства (441) получим

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2 \text{ и } \varphi_1 = \varphi_2,$$

т. е. угол сдвига фаз между током I_1 и напряжением U_1 первичной цепи трансформатора практически равен углу сдвига фаз между током I_2 и напряжением U_2 вторичной цепи трансформатора.

Обычно не весь магнитный поток, создаваемый током первичной обмотки, пронизывает целиком все витки вторичной обмотки. Часть этого потока, называемая потоком рассеяния Φ_{S_1} первичной обмотки, замыкается через воздух. Этот поток рассеяния не индуцирует электродвижущую силу во вторичной обмотке и является по сути дела бесполезным магнитным потоком.

Одновременно с этим существует и поток рассеяния Φ_{S_2} во вторичной обмотке трансформатора, который также замыкается через воздух и не пронизывает витки первичной обмотки.

Магнитное рассеяние в трансформаторах нежелательно, так как оно вызывает дополнительное падение напряжения в обмотке трансформатора, что несколько снижает напряжение на зажимах потребителя.

§ 142. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА НАГРУЖЕННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В основу построения векторной диаграммы возьмем вектор результирующего рабочего магнитного потока Φ , который, как известно, сохраняет неизменное действующее значение при всех режимах работы трансформатора, если действующее значение напряжения U_1 , приложенного к первичной обмотке трансформатора, неизменно. Действующее значение результирующего магнитного потока Φ находим по формуле

$$\Phi = \frac{U_{L1}}{4,44f\omega_1} \approx \frac{U_1}{4,44f\omega_1}.$$

Полагая, что начальная фаза результирующего магнитного потока Φ равна нулю, т. е. $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$, отложим вектор Φ на векторной диаграмме (рис. 319) по начальной оси.

Вектор тока холостого хода I_0 трансформатора отложим под углом α к вектору результирующего магнитного потока Φ в сторону опережения, т. е. против движения часовой стрелки. Величину угла α найдем по его тангенсу

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I_a}{I_\mu}, \quad (442)$$

где $I_a = \frac{P_{ст}}{U_L}$ — активная составляющая тока холостого хода (см. формулу 430);

$I_\mu = \frac{AW_m}{\sqrt{2}w}$ — намагничивающая составляющая тока (см. формулу 429).

Результирующий магнитный поток Φ индуцирует в первичной катушке электродвижущую силу самоиндукции E_1 , а во вторичной обмотке — электродвижущую силу взаимной индукции E_2 ; каждая из них отстает от магнитного потока Φ на угол $\frac{\pi}{2}$. В соответствии с этим отложим векторы E_1 и E_2 на

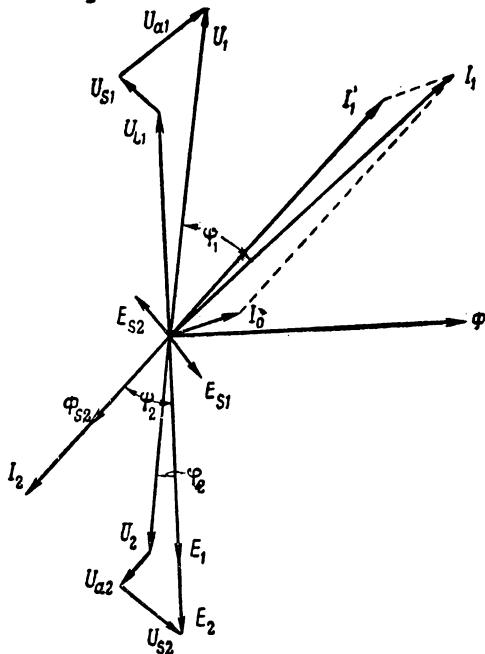


Рис. 319. Векторная диаграмма для нагруженного трансформатора при индуктивной нагрузке

векторной диаграмме под углом $\frac{\pi}{2}$ к вектору Φ в сторону отставания (по часовой стрелке).

Электродвижущая сила E_2 показана на векторной диаграмме несколько большей, чем электродвижущая сила E_1 , т. е. в данном случае мы строим векторную диаграмму для повышающего трансформатора.

Полагая, что нагрузка во вторичной цепи трансформатора носит индуктивный характер, отложим вектор тока I_2 вторичной обмотки трансформатора, отстающий от вектора электродвижущей силы E_2 на некоторый угол ϕ_2 .

Под действием тока I_2 во вторичной обмотке возникает магнитодвижущая

сила, или, иначе сказать, ампер-витки $I_2\omega_2$, размагничивающее действие которых уравнивается соответствующим числом ампер-витков первичной обмотки. Поэтому ток I_1 первичной обмотки на векторной диаграмме представим как геометрическую сумму двух токов: тока холостого хода I_0 , который не зависит от общей нагрузки, и тока I'_1 , зависящего от нагрузки трансформатора, находящегося в противофазе с током I_2 вторичной цепи трансформатора и создающего в первичной обмотке трансформатора ампер-витки $I'_1\omega_1$, равные и противоположные по знаку ампер-виткам вторичной обмотки $I_2\omega_2$, т. е.

$$\bar{I}'_1\omega_1 = -\bar{I}_2\omega_2. \quad (443)$$

В соответствии с этим ток I_1 на векторной диаграмме покажем как геометрическую сумму двух токов, I_0 и I'_1 :

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}'_1, \text{ где } |\bar{I}'_1| = \left| \frac{\omega_2}{\omega_1} I_2 \right| \text{ и } \bar{I}'_1 = -\frac{\omega_2}{\omega_1} \bar{I}_2.$$

Если нагрузка трансформатора (ток I_2) будет изменяться по величине, а также будет изменяться и угол ϕ_2 сдвига фаз между током I_2 и электродвижущей силой E_2 , то соответственно будут изменяться составляющая тока I'_1 в первичной цепи трансформатора, а следовательно, величина самого тока I_1 и углы сдвига фаз между ним и напряжением U_1 , приложенным к первичной обмотке трансформатора.

Магнитный поток рассеяния во вторичной обмотке Φ_{S_2} совпадает по фазе с током I_2 , а поэтому на векторной диаграмме отложим вектор Φ_{S_2} в направлении вектора тока I_2 .

Магнитный поток рассеяния Φ_{S_2} индуцирует электродвижущую силу самоиндукции рассеяния E_{S_2} , отстающую от него на угол $\frac{\pi}{2}$. В соответствии с этим вектор E_{S_2} отложим на векторной диаграмме под углом $\frac{\pi}{2}$ к вектору Φ_{S_2} в сторону отставания от него.

Электродвижущая сила E_2 во вторичной катушке равна геометрической сумме трех составляющих:

$$\bar{E}_2 = \bar{I}_2 r_2 + U_{S_2} + \bar{U}_2, \quad (444)$$

где E_2 — электродвижущая сила взаимной индукции во вторичной обмотке трансформатора;

$I_2 r_2$ — падение напряжения в активном сопротивлении вторичной обмотки, совпадающее по фазе с током I_2 ;

U_{S_2} — та часть электродвижущей силы, которая компенсирует электродвижущую силу рассеяния E_{S_2} и находится с ней в противофазе;

U_2 — напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора.

В соответствии с этим наносим на векторную диаграмму векторы $U_{a2} = I_2 r_2$; $U_{S2} = -E_{S2}$ и U_2 .

Напряжение U_2 на векторной диаграмме показано отстающим по фазе от электродвижущей силы E_2 на угол $(\psi_2 - \varphi_2)$, а ток I_2 показан отстающим от напряжения U_2 на угол φ_2 из-за индуктивного характера нагрузки.

Угол φ_2 зависит от параметров внешней цепи и определяется через его тангенс по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{x}{r}, \quad (445)$$

где r — активное сопротивление потребителя;

x — реактивное (индуктивное) сопротивление потребителя.

Ток I_1 первичной обмотки трансформатора создает магнитный поток рассеяния Φ_{S1} , который совпадает с ним по фазе, а поэтому отложим на векторе тока I_1 в векторной диаграмме вектор Φ_{S1} .

Магнитный поток рассеяния Φ_{S1} индуцирует электродвижущую силу самоиндукции рассеяния E_{S1} , которая отстает от потока Φ_{S1} на угол $\frac{\pi}{2}$, а поэтому вектор E_{S1} на векторной диаграмме отложим под углом $\frac{\pi}{2}$ к вектору Φ_{S1} в сторону отставания от него.

Напряжение U_1 , приложенное к первичной обмотке трансформатора, равно геометрической сумме трех составляющих:

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_{L1} + \bar{U}_{S1} + \bar{U}_{a1}, \quad (446)$$

где U_1 — напряжение, приложенное к первичной обмотке трансформатора;

U_{L1} — та часть напряжения U_1 , которая компенсирует электродвижущую силу самоиндукции E_1 и, следовательно, находится в противофазе с ней;

U_{S1} — та часть напряжения, которая компенсирует электродвижущую силу самоиндукции рассеяния E_{S1} и, следовательно, находится с ней в противофазе;

U_{a1} — та часть напряжения, которая расходуется в активном сопротивлении первичной обмотки и совпадает по фазе с током I_1 .

Наносим на векторную диаграмму векторы U_{L1} , U_{S1} , U_{a1} и строим по ним вектор напряжения U_1 .

Угол φ_1 на диаграмме — это угол сдвига фаз тока I_1 и напряжения U_1 в первичной обмотке трансформатора. Он положителен, так как трансформатор имеет нагрузку индуктивного характера.

§ 143. ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТРАНСФОРМАТОРА

С изменением нагрузки трансформатора изменяется и напряжение U_2 на его вторичных зажимах.

Зависимость величины напряжения U_2 на вторичных зажимах трансформатора от нагрузки (тока I_2) называется внешней характеристикой трансформатора. При увеличении тока I_2 увеличивается и ток I_1 в первичной цепи его. Одновременно с этим растут соответственно магнитные потоки рассеяния Φ_{S_1} и Φ_{S_2} , а также электродвижущие силы самоиндукции рассеяния E_{S_1} и E_{S_2} , индуктированные этими потоками. Увеличиваются также напряжения U_{S_1} и U_{S_2} , компенсирующие электродвижущие силы E_{S_1} и E_{S_2} , так как $\overline{U}_{S_1} = -\overline{E}_{S_1}$ и $\overline{U}_{S_2} = -\overline{E}_{S_2}$. Одновременно с ростом токов I_1 и I_2 увеличиваются падения напряжений и в активных сопротивлениях первичной ($U_{a1} = I_1 r_{m1}$) и вторичной ($U_{a2} = I_2 r_{m2}$) обмоток трансформатора.

Так как действующее значение напряжения U_1 , приложенного к первичной обмотке трансформатора, сохраняется постоянным, а падения напряжений U_{a1} и U_{S_1} с ростом тока I_1 растут, то часть этого напряжения U_{L_1} , которая компенсирует электродвижущую силу самоиндукции E_1 , должна уменьшиться. А это произойдет только в том случае, если уменьшится электродвижущая сила самоиндукции E_1 , поскольку $U_{L_1} = -E_1$. Уменьшение же электродвижущей силы самоиндукции E_1 непосредственно связано с уменьшением результирующего магнитного потока Φ , потому что

$$\Phi = \frac{U_{L_1}}{4,44f\omega_1} = \frac{E_1}{4,44f\omega_1}.$$

Но если результирующий магнитный поток (рабочий поток) Φ в сердечнике трансформатора уменьшится, то это повлечет за собой уменьшение электродвижущей силы E_2 , индуктированной во вторичной обмотке трансформатора.

Следовательно, если с ростом нагрузки трансформатора уменьшается электродвижущая сила E_2 во вторичной обмотке трансформатора и в то же время увеличиваются падения напряжения в ней $U_{a2} = I_2 r_{m2}$ и $U_{S_2} = -E_{S_2}$, то напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора U_2 должно уменьшиться. Из векторной диаграммы (рис. 319) видим, что это уменьшение будет тем значительней, чем больше будет отставать на фазе ток I_2 от электродвижущей силы E_2 , т. е. чем более резко будет выражен индуктивный характер нагрузки трансформатора. Наоборот, если трансформатор имеет нагрузку емкостного характера, то с увеличением нагрузки (тока I_2) напряжение на вторичных зажимах трансформатора будет изменяться в сторону возрастания его. На рис. 320 приведена векторная диаграмма для работающего трансформатора при емкостной нагрузке. Здесь показано,

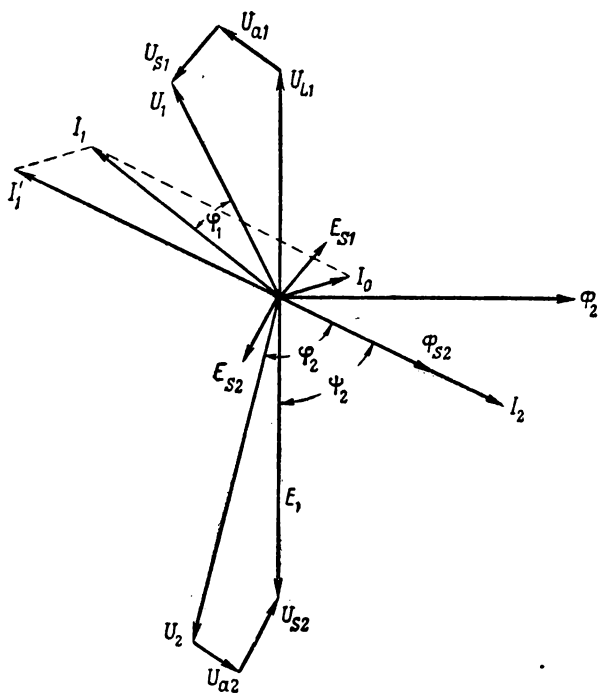


Рис. 320. Векторная диаграмма для работающего трансформатора при емкостной нагрузке

что токи I_1 и I_2 опережают по фазе соответствующие им напряжения U_1 и U_2 . Напряжение U_2 несколько больше электродвижущей силы E_2 , а сдвиг фаз тока I_2 и напряжения U_2 больше, чем сдвиг фаз этого тока и электродвижущей силы E_2 . На рис. 321 приведены три внешние характеристики трансформатора соответственно для трех различных режимов работы

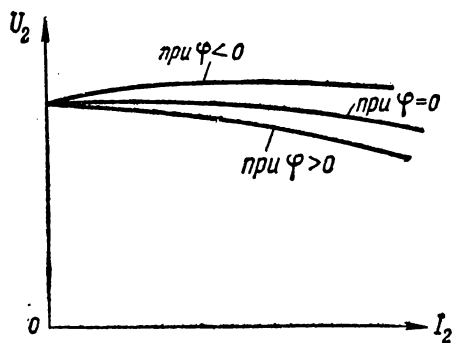


Рис. 321. Внешние характеристики трансформатора

его: при $\varphi < 0$ (емкостный характер нагрузки), при $\varphi = 0$ (чисто активный характер нагрузки) и $\varphi > 0$ (индуктивный характер нагрузки).

Надо сказать, что падение напряжения во вторичной обмотке силовых трансформаторов в пределах от холостого хода до нормальной нагрузки составляет не более двух — трех процентов номинального напряжения трансформатора.

§ 144. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

При работе трансформатора полная мощность, потребляемая его первичной обмоткой, складывается из полезной мощности, потребляемой во вторичной цепи, и из потерь в самом трансформаторе на вихревые токи и перемагничивание, а также из потерь в обмотках его катушек:

$$P_1 = P_2 + P_c + I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2; \quad (447)$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cdot \cos \varphi_2,$$

где P_2 — мощность, расходуемая во вторичной цепи потребителем;

P_c — мощность, расходуемая в стали трансформатора;

$I_1^2 r_1$ — мощность, расходуемая в активном сопротивлении первичной обмотки трансформатора;

$I_2^2 r_2$ — мощность, расходуемая в активном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора.

Магнитный поток в трансформаторе, как мы выяснили выше, не изменяется с изменением нагрузки, а поэтому и величина магнитной индукции сохраняется неизменной, если действующее значение напряжения U , приложенного к первичной цепи, неизменно. Но при постоянстве магнитной индукции B потери на вихревые токи и перемагничивание постоянны, т. е. потери в стали трансформатора не зависят от его нагрузки, в отличие от потерь в меди обмоток трансформатора $I_1^2 r_1$ и $I_2^2 r_2$, растущих с увеличением нагрузки.

Коэффициент полезного действия трансформатора очень высок. Для мощных трансформаторов, применяемых в силовых установках, он достигает примерно 99 %.

Коэффициент полезного действия трансформаторов малой мощности, применяемых в технике связи, колеблется в пределах 50—70 %.

Наибольший коэффициент полезного действия трансформатора получается при равенстве потерь в стали и меди:

$$P_c = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2, \quad (448)$$

что соответствует нормальной нагрузке трансформатора (рис. 322).

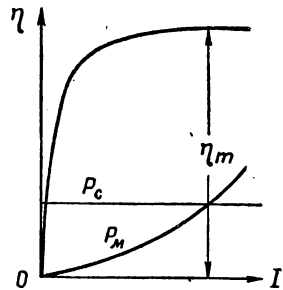


Рис. 322. Кривая зависимости к. п. д. трансформатора от его нагрузки

§ 145. ТИПЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В современной электротехнике широко применяются самые разнообразные трансформаторы, начиная от маломощных, применяемых в технике связи, и кончая мощными силовыми трансформаторами, применяемыми в осветительных, силовых установках и в линиях передачи электроэнергии на дальние расстояния.

Трансформаторы однофазного тока по своей конструкции подразделяются на два основных типа — стержневой и броневой.

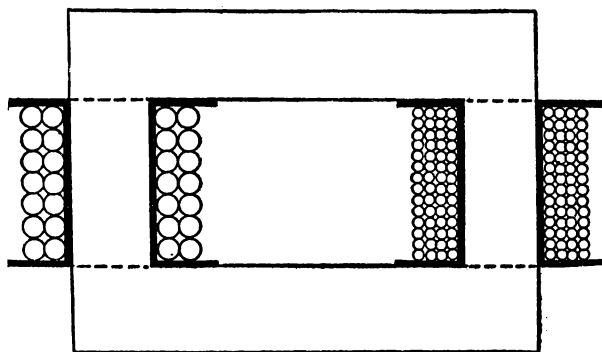


Рис. 323. Стержневой трансформатор

В стержневом трансформаторе первичная и вторичная обмотки размещены на общем неразветвленном стальном сердечнике (рис. 323).

В броневом трансформаторе (рис. 324) катушки насажены на средний стержень разветвленного стального сердечника так, что магнитопровод замыкается вокруг этих катушек.

Чтобы свести потери на перемагничивание и вихревые токи в трансформаторе к минимуму, сердечники трансформаторов изготавливают из специальных сортов стали и собирают их из отдельных листов стали толщиной 0,35—0,5 мм, изолированных друг от друга лаком.

Для уменьшения магнитного рассеяния в трансформаторе и намагничивающего тока при сборке сердечника трансформатора воздушные зазоры между отдельными частями сердечника сводят к минимуму. С этой целью стальные листы сердечников трансформатора собирают внакладку или впритык, чтобы они тесно соприкасались друг с другом. На рис. 325 показаны детали трансформатора Ш-образной формы и порядок сборки сердечника трансформатора.

Для достижения хорошей изоляции в трансформаторе его катушки тщательно изолируют как одну от другой, так и от сердечника. Для этого их собирают на специальном каркасе из ка-

кого-либо изоляционного материала (см. рис. 325), например из специального изоляционного картона.

Провода для обмоток трансформатора обычно берут медные с очень хорошей изоляцией. Если обмотки трансформатора располагаются коаксиально на стальном сердечнике, то, как правило, обмотка высокого напряжения располагается поверх обмотки низкого напряжения.

Трансформаторы малой мощности обычно рассчитаны на естественное воздушное охлаждение. Наобо-

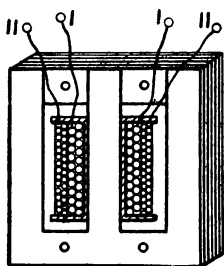


Рис. 324. Броневой трансформатор

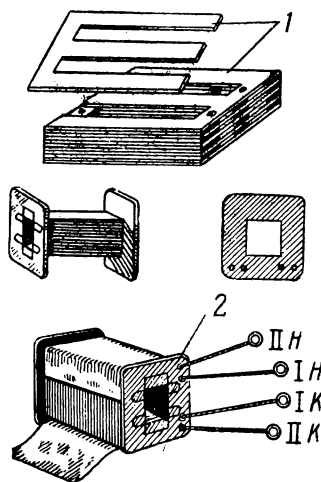


Рис. 325. Трансформатор Ш-образной формы:
1 — пластины; 2 — катушки

рот, трансформаторы высоких мощностей, выделяющие значительное количество тепла при работе, требуют специального охлаждения, поэтому их обмотки обычно погружают в трансформаторное масло.

На рис. 326 показаны маломощные трансформаторы со стальными сердечниками, предназначенные для обслуживания цепей

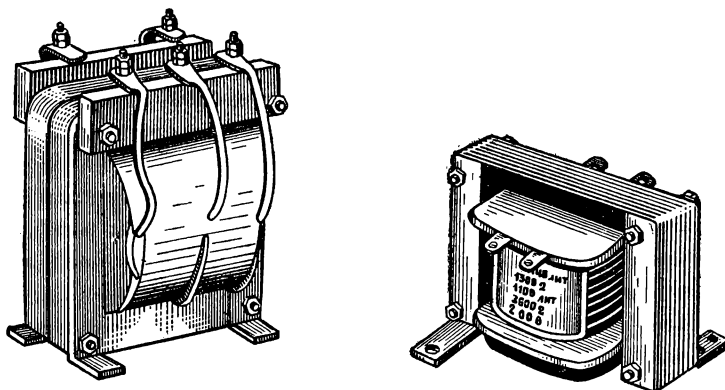


Рис. 326. Трансформаторы низкой частоты

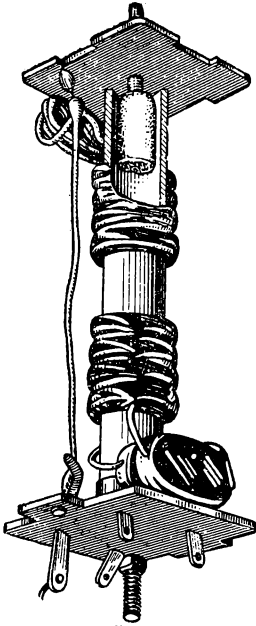


Рис. 327. Трансформатор высокой частоты с сердечником из магнетодиэлектрика

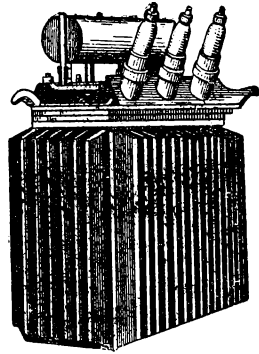


Рис. 328. Трансформатор трехфазного тока

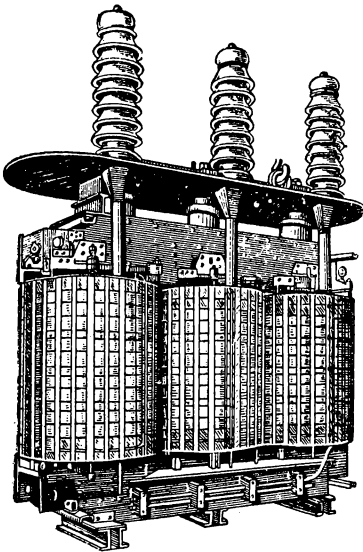


Рис. 329. Мощный трансформатор

с низкими частотами электрических колебаний. Трансформаторы данного типа широко применяются в технике связи.

На рис. 327 показан маломощный трансформатор с сердечником из магнетодиэлектрика, предназначенный для обслуживания цепей с высокими частотами электрических колебаний. Наличие магнетодиэлектрического сердечника в этом трансформаторе сводит к минимуму мощность потерь на перемагничивание и вихревые токи. Трансформаторы данного типа широко применяются в радиотехнике.

На рис. 328 показан трансформатор трехфазного тока, применяемый в силовоточной электротехнике.

На рис. 329 показан мощный трансформатор, применяемый в линиях передачи высокого напряжения на большие расстояния,

§ 146. АВТОТРАНСФОРМАТОР

Автотрансформатором называется такой трансформатор, в котором первичная и вторичная обмотки объединены в одну общую электрическую цепь.

На рис. 330 приведена схема автотрансформатора, где источник электрической энергии подключен ко всем виткам w_1 обмотки автотрансформатора, а потребитель — к некоторой части этой обмотки, обладающей числом витков w_2 .

При прохождении переменного тока по обмотке автотрансформатора возникает переменный магнитный поток, индуктирующий в этой обмотке электродвижущую силу, величина которой пропорциональна числу витков обмотки. Следовательно, если во всей обмотке автотрансформатора, имеющей число витков w_1 , индуктируется электродвижущая сила E_1 , то в части этой обмотки, имеющей число витков w_2 , индуктируется электродвижущая сила E_2 . Соотношение величин этих электродвижущих сил такое, что

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k, \quad (449)$$

где k — коэффициент трансформации.

Так как падение напряжения в активном сопротивлении обмотки автотрансформатора относительно мало, то им практически можно пренебречь и считать справедливыми равенства

$$U_1 = E_1 \text{ и } U_2 = E_2,$$

где U_1 — напряжение источника электрической энергии, поданное на всю обмотку автотрансформатора, имеющую число витков w_1 ;

U_2 — напряжение, подаваемое на потребитель, снимаемое с той части обмотки автотрансформатора, которая обладает числом витков w_2 .

Следовательно,

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k, \quad (450)$$

т. е. напряжение U_1 , приложенное со стороны источника электрической энергии ко всем виткам w_1 обмотки автотрансформатора, во столько раз больше напряжения U_2 , снимаемого с части обмотки, обладающей числом витков w_2 , во сколько раз число витков w_1 больше числа витков w_2 .

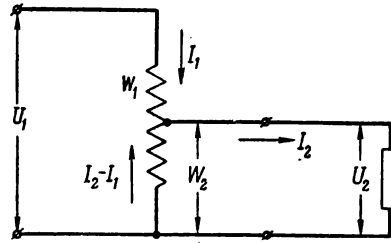


Рис. 330. Схема автотрансформатора

Если к автотрансформатору подключен потребитель электрической энергии, то под влиянием напряжения U_2 в нем возникает электрический ток, действующее значение которого обозначим I_2 . В соответствии с этим в первичной цепи автотрансформатора будет ток, действующее значение которого обозначим I_1 .

Однако ток в верхней части обмотки автотрансформатора (см. рис. 330), имеющей число витков ($w_1 - w_2$), будет отличаться от тока в нижней ее части, имеющей число витков w_2 . Это объясняется тем, что в верхней части обмотки протекает только ток I_1 , а в нижней части — некоторый результирующий ток, представляющий собой разность токов I_1 и I_2 . Дело в том, что согласно правилу Ленца индуктированное электрическое поле в обмотке автотрансформатора направлено навстречу электрическому полю, созданному в ней источником электрической энергии. Поэтому токи I_1 и I_2 в нижней части обмотки автотрансформатора направлены навстречу друг другу, т. е. находятся в противофазе.

Сами токи I_1 и I_2 , как и в обычном трансформаторе, связаны соотношением

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}$$

или

$$I_2 = \frac{w_1}{w_2} I_1. \quad (451)$$

Так как в понижающем автотрансформаторе $w_1 > w_2$, то $I_2 > I_1$ и результирующий ток в нижней части обмотки автотрансформатора равен

$$I_2 - I_1.$$

Следовательно, в той части обмотки автотрансформатора, с которой подается напряжение на потребитель, ток значительно меньше тока в потребителе, т. е.

$$I_2 - I_1 \ll I_2.$$

Это позволяет значительно снизить расход энергии в обмотке автотрансформатора на нагрев ее проволоки и применить провод для обмотки меньшего сечения, т. е. снизить расход цветного металла, уменьшить вес и габариты автотрансформатора.

Если автотрансформатор повышающий, то напряжение со стороны источника электрической энергии подводится к части витков обмотки трансформатора, а на потребитель подается напряжение со всех его витков.

Автотрансформаторы нашли широкое применение в телефонных аппаратах, радиотехнических устройствах, для питания выпрямителей и т. д.

ГЛАВА XXVII

ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПРИЛОЖЕННЫМ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

§ 147. ПРИМЕНЕНИЕ РЯДА ФУРЬЕ К ИССЛЕДОВАНИЮ СЛОЖНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

В электротехнике часто встречаются цепи, в которых имеются негармонические колебания, или, иначе сказать, несинусоидальные токи и напряжения. Например, в цепи, имеющей катушку со стальным сердечником, при синусоидальном напряжении, приложенном к катушке, протекает несинусоидальный ток.

Что же касается радиотехники, телефонии, телеграфии, то там, как правило, приходится иметь дело со сложными электрическими колебаниями.

В основу исследования сложных периодических колебаний положена **теорема Фурье**, согласно которой периодическую сложную кривую можно разложить в ряд на бесконечно большое число отдельных синусоидальных (гармонических) составляющих.

Применение ряда Фурье к исследованию сложных периодических колебаний сводится к тому, что путем соответствующих математических приемов представляют данную несинусоидальную величину, например, напряжение, приложенное к цепи, в виде суммы отдельных синусоидальных величин (гармоник). Число членов суммы (ряда) обычно берут небольшим, так как все остальные, отброшенные члены бесконечного ряда при суммировании дают такую малую величину, которой практически можно пренебречь. После этого определяют мгновенные значения тока, создаваемого каждой отдельной гармоникой напряжения, а затем эти значения складывают алгебраически и получают формулу для определения мгновенного значения результирующего несинусоидального тока.

Разложить сложное периодическое колебание на ряд гармонических колебаний — это значит определить отдельные гармонические колебания, составляющие его, т. е. определить амплитуды

и начальные фазы отдельных гармонических колебаний, или, иначе, гармоник.

Частоты отдельных гармоник сложного колебания кратны частоте основного сложного колебания. При этом первая, основная гармоника имеет частоту колебаний, одинаковую с частотой сложного колебания. Вторая гармоника имеет двойную частоту, третья — тройную и т. д. Порядковое число гармоники показывает, во сколько раз частота ее колебаний больше основной частоты колебаний, равной частоте первой гармоники.

Если есть некоторая постоянная составляющая сложного колебания, то ее частота принимается равной нулю и ее считают нулевой гармоникой.

Амплитуды отдельных гармоник сложного колебания различны и зависят от формы сложной кривой.

Напряжение, изменяющееся периодически по некоторой сложной кривой, согласно теореме Фурье можно представить в виде следующего ряда:

$$u = U_0 + U_{1m} \cdot \sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m} \cdot \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + U_{km} \cdot \sin(k\omega t + \psi_k) + \dots,$$

где u — мгновенное значение напряжения, изменяющегося периодически по некоторой сложной кривой;

U_0 — постоянная составляющая напряжения;

U_{1m} — амплитуда первой гармоники;

$\omega t + \psi_1$ — фаза первой гармоники;

ψ_1 — начальная фаза первой гармоники;

U_{km} — амплитуда k -й гармоники;

$(k\omega t + \psi_k)$ — фаза k -й гармоники;

ψ_k — начальная фаза k -й гармоники.

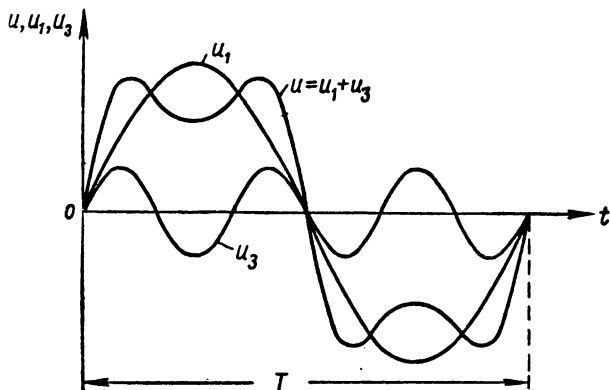


Рис. 331. Кривая несинусоидального напряжения, состоящая из совокупности первой и третьей гармоник с начальными фазами, равными нулю

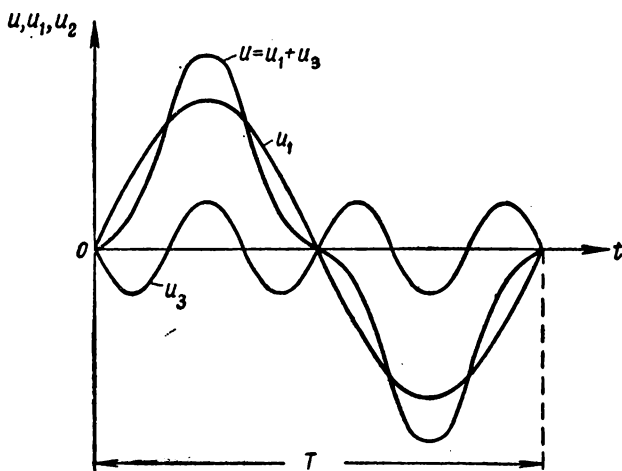


Рис. 332. Кривая несинусоидального напряжения, состоящая из совокупности первой и третьей гармоник, имеющих различные начальные фазы

Ниже приведены гармоники нескольких наиболее типичных несинусоидальных величин:

1. На рис. 331 представлена кривая несинусоидального напряжения, состоящего из двух нечетных гармоник, содержащих синусы, с начальными фазами, равными нулю:

$$u = u_1 + u_3 = U_{1m} \cdot \sin \omega t + U_{3m} \cdot \sin 3\omega t. \quad (452)$$

2. На рис. 332 представлена кривая несинусоидального напряжения, состоящего из двух нечетных гармоник, содержащих синусы, с различными начальными фазами:

$$u = u_1 + u_3 = U_{1m} \cdot \sin \omega t + U_{3m} \cdot \sin (3\omega t + \pi). \quad (453)$$

3. На рис. 333 представлена кривая напряжения при однополупериодном выпрямлении синусоиды. Эта кривая раскладывается в ряд вида

$$u = \frac{U_m}{\pi} \left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot \sin \omega t - \frac{2}{1.3} \cdot \cos 2\omega t - \frac{2}{3.5} \cdot \cos 4\omega t - \right. \\ \left. - \frac{2}{5.7} \cdot \sin 6\omega t - \frac{2}{7.9} \cdot \cos 8\omega t - \dots \right). \quad (454)$$

4. На рис. 334 представлена кривая напряжения при двухполупериодном выпрямлении синусоиды, которая раскладывается в ряд вида

$$u = \frac{2U_m}{\pi} \left(1 - \frac{2 \cdot \cos 2\omega t}{1.3} - \frac{2 \cdot \cos 4\omega t}{3.5} - \frac{2 \cdot \cos 6\omega t}{5.7} - \dots \right). \quad (455)$$

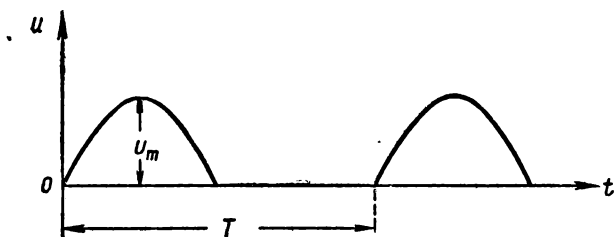


Рис. 333. Кривая напряжения при однополупериодном выпрямлении синусоиды

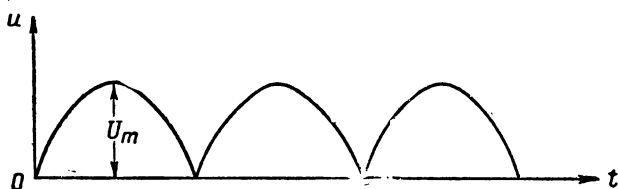


Рис. 334. Кривая напряжения при двухполупериодном выпрямлении синусоиды

5. На рис. 335 представлен график несинусоидального напряжения, подводимого к телеграфному аппарату М-44 при посылке точек, разлагаемый в ряд вида

$$u = \frac{U}{2} + \frac{2U}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \cdot \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \cdot \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \cdot \sin 7\omega t + \dots + \frac{1}{k} \cdot \sin k\omega t + \dots \right), \quad (456)$$

где U — напряжение, приложенное к началу линии;

u — мгновенное значение напряжения;

k — произвольное нечетное число.

Из формулы (456) следует, что постоянная составляющая равна половине приложенного напряжения и что в ряде Фурье имеются гармоники только нечетного порядка: $k = 1, 3, 5$ и т. д.

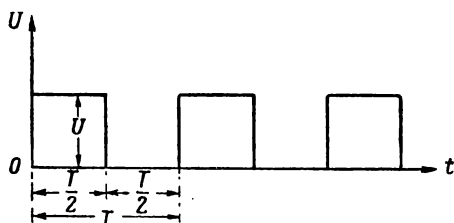


Рис. 335. График несинусоидального напряжения в цепи при посылке точек

Пример 187. Разложить периодическую кривую напряжения (рис. 335), если приложенное напряжение $U = 24$ в, а период колебаний $T = \frac{1}{3}$ сек.

Решение. Постоянная составляющая

$$U_0 = \frac{U}{2} = \frac{24}{2} = 12 \text{ в.}$$

Амплитуда первой гармоники

$$U_{1m} = \frac{2U}{\pi} = \frac{2 \cdot 24}{3,14} = 15,3 \text{ в.}$$

Угловая частота первой гармоники

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2 \cdot 3,14}{\frac{1}{3}} = 18,84 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Амплитуда третьей гармоники

$$U_{3m} = \frac{2U}{\pi \cdot 3} = \frac{2 \cdot 24}{3,14 \cdot 3} = 5,1 \text{ в.}$$

Угловая частота третьей гармоники

$$\omega_3 = 3\omega_1 = 3 \cdot 18,84 = 56,52 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Амплитуда пятой гармоники

$$U_{5m} = \frac{2U}{\pi \cdot 5} = \frac{2 \cdot 24}{3,14 \cdot 5} = 3,06 \text{ в.}$$

Угловая частота пятой гармоники

$$\omega_5 = 5\omega_1 = 5 \cdot 18,84 = 94,2 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Амплитуда седьмой гармоники

$$U_{7m} = \frac{2U}{\pi \cdot 7} = \frac{2 \cdot 24}{3,14 \cdot 7} = 2,19 \text{ в.}$$

Угловая частота седьмой гармоники

$$\omega_7 = 7\omega_1 = 7 \cdot 18,84 = 131,88 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Амплитуда девятой гармоники

$$U_{9m} = \frac{2U}{\pi \cdot 9} = \frac{2 \cdot 24}{3,14 \cdot 9} = 1,7 \text{ в.}$$

Угловая частота девятой гармоники

$$\omega_9 = 9\omega_1 = 9 \cdot 18,84 = 169,56 \frac{1}{\text{сек}}$$

и т. д.

Следовательно, мгновенное значение напряжения определится формулой

$$u = 12 + 15,3 \cdot \sin 18,84t + 5,1 \cdot \sin 56,52t + 3,06 \cdot \sin 94,2t + \\ + 2,19 \cdot \sin 131,88t + 1,7 \cdot \sin 169,56t + \dots$$

На рис. 336 показаны графики постоянной составляющей первой, третьей, пятой и седьмой гармоник и результирующее колебание для рассмотренного нами случая периодической посылки точек телеграфным аппаратом М-44.

Для того чтобы судить о степени искажения кривой тока (напряжения), т. е. отличия ее от синусоиды, пользуются некоторыми общепринятыми коэффициентами.

Коэффициент формы K_{ϕ} характеризует собой величину отношения действующего значения тока (напряжения) к среднему значению тока (напряжения) за положительную полуволну:

$$K_{\phi} = \frac{I}{I_{\text{cp}}\left(\frac{T}{2}\right)}, \quad (457)$$

где I — действующее значение тока;

$I_{\text{cp}}\left(\frac{T}{2}\right)$ — среднее значение тока за первую половину периода;

K_{ϕ} — коэффициент формы.

Для синусоидального тока коэффициент формы равен

$$K_{\phi} = \frac{I}{I_{\text{cp}}\left(\frac{T}{2}\right)} = \frac{\frac{I_m}{\sqrt{2}}}{\frac{2}{\pi} I_m} = 1,11.$$

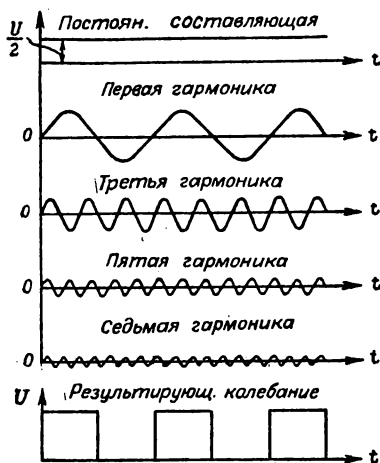


Рис. 336. Графики напряжения и его отдельных гармоник при посылке точек

Коэффициент амплитуды K_a характеризует величину отношения амплитуды к действующему значению тока (напряжения):

$$K_a = \frac{I_m}{I}, \quad (458)$$

где I_m — амплитуда тока;

I — действующее значение тока;

K_a — коэффициент амплитуды.

Для синусоидального тока коэффициент амплитуды равен

$$K_a = \frac{I_m}{I} = \frac{I_m}{\frac{I_m}{\sqrt{2}}} = \sqrt{2}.$$

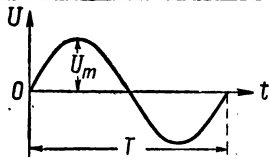
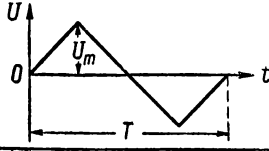
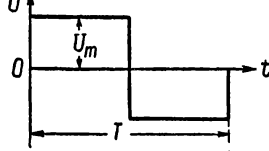
Коэффициент искажения K_{κ} характеризует величину отношения действующего значения первой гармоники тока к действующему значению несинусоидального тока:

$$K_{\kappa} = \frac{I_1}{I}, \quad (459)$$

где I_1 — действующее значение первой гармоники тока;
 I — действующее значение несинусоидального тока;
 K_n — коэффициент искажения.

Для синусоиды коэффициент искажения $K_n = 1$.

Ниже приведены для сравнения коэффициенты формы, амплитуды и искажения для некоторых типичных сложных кривых напряжения.

Вид кривой	Действующее значение	Среднее значение за половину периода	K_Φ	K_a	K_u
	$\frac{U_m}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{\pi} U_m$	1,1	$\sqrt{2}$	1,0
	$\frac{U_m}{\sqrt{3}}$	$\frac{U_m}{2}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{3}$	$\frac{4\sqrt{6}}{\pi^2}$
	U_m	U_m	1	1	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi}$

Из приведенной таблицы видно, что кривая напряжения треугольной формы имеет все коэффициенты более близкие к коэффициентам синусоиды, чем кривая напряжения прямоугольной формы.

§ 148. РЕЖИМ В ЦЕПИ ПРИ ПРИЛОЖЕННОМ К НЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМУ НАПРЯЖЕНИИ

Допустим, что к цепи, состоящей из последовательно соединенных активного сопротивления r , индуктивности L и емкости C (рис. 337), приложено несинусоидальное напряжение вида

$$u = U_0 + U_{1m} \cdot \sin \omega t + U_{3m} \cdot \sin 3\omega t + \dots + U_{km} \cdot \sin k\omega t + \dots \quad (460)$$

Чтобы определить закон изменения мгновенного значения тока в данной цепи, необходимо определить мгновенное значение

тока, создаваемого каждой из отдельных гармоник напряжения, а затем, сложив их алгебраически, получим искомое решение.

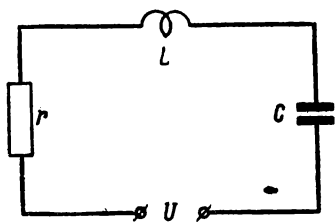
В рассматриваемой цепи постоянная составляющая составляющая напряжения U_0 , как нулевая гармоника, не создает тока, так как емкостное сопротивление в цепи при угловой частоте $\omega_0 = 0$ будет бесконечно большим:

$$x_{C0} = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{2}{0 \cdot C} = \frac{1}{0} = \infty.$$

Первая (основная) гармоника напряжения создает ток в цепи, мгновенное значение которого i_1 определяется по формуле

$$i_1 = \frac{U_{1m}}{Z_1} \cdot \sin(\omega t - \varphi_1) = I_{1m} \cdot \sin(\omega t - \varphi_1),$$

где φ_1 — угол сдвига фаз напряжения и тока первой гармоники, определяемый по его тангенсу



$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r};$$

Z_1 — полное сопротивление цепи для тока первой гармоники, определяемое по формуле

$$Z_1 = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Рис. 337. Цепь с последовательно соединенными r , L и C

Третья гармоника напряжения создает ток, мгновенное значение которого i_3 можно определить по формуле

$$i_3 = \frac{U_{3m} \cdot \sin(3\omega t - \varphi_3)}{Z_3} = I_{3m} \cdot \sin(3\omega t - \varphi_3),$$

где φ_3 — угол сдвига фаз напряжения и тока третьей гармоники, определяемый по его тангенсу

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{3\omega L - \frac{1}{3\omega C}}{r};$$

Z_3 — полное сопротивление цепи для тока третьей гармоники, определяемое по формуле

$$Z_3 = \sqrt{r^2 + \left(3\omega L - \frac{1}{3\omega C}\right)^2}.$$

Гармоника напряжения U_k создает ток в цепи, мгновенное значение которого i_k определяется по формуле

$$i_k = \frac{U_{km} \cdot \sin(k\omega t - \varphi_k)}{Z_k} = I_{km} \cdot \sin(k\omega t - \varphi_k),$$

где Z_k — полное сопротивление цепи k -й гармоники тока, определяемое по формуле

$$Z_k = \sqrt{r^2 + \left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C}\right)^2},$$

и φ_k — угол сдвига фаз тока и напряжения, определяемый по тангенсу его

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{k\omega L - \frac{1}{k\omega C}}{r}.$$

Складывая алгебраически мгновенные значения токов отдельных гармоник, получаем выражение для мгновенного значения несинусоидального тока в заданной цепи:

$$i = i_1 + i_3 + \dots + i_k + \dots = I_{1m} \cdot \sin(\omega t - \varphi_1) + I_{3m} \cdot \sin(3\omega t - \varphi_3) + \dots + I_{km} \cdot \sin(k\omega t - \varphi_k) + \dots \quad (461)$$

Действующее значение тока для любой гармоники тока равно амплитудному значению тока этой гармоники, деленному на $\sqrt{2}$:

$$I_1 = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}}; I_2 = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}} \text{ и т. д.,}$$

где I_1, I_2 и т. д. — действующие значения токов отдельных гармоник.

Действующее значение несинусоидального тока равно корню квадратному из суммы квадратов действующих значений токов отдельных гармоник и постоянной составляющей:

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2 \dots} \quad (462)$$

Аналогично для действующего значения несинусоидального напряжения

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_k^2 \dots}, \quad (463)$$

т. е. действующее значение несинусоидального напряжения равно корню квадратному из суммы квадратов действующих значений отдельных гармоник и постоянной составляющей.

Пример 188. К цепи приложено несинусоидальное напряжение

$$u = 150 \cdot \sin \omega t + 50 \cdot \sin 3\omega t + 30 \cdot \sin 5\omega t.$$

Определить показание вольтметра, подключенного к зажимам этой цепи. Решение. Действующие значения напряжений отдельных гармоник

$$U_1 = \frac{150}{\sqrt{2}} = 106,3 \text{ в}; U_3 = \frac{50}{\sqrt{2}} = 35,4 \text{ в} \text{ и } U_5 = \frac{30}{\sqrt{2}} = 21,26 \text{ в.}$$

Действующее значение несинусоидального напряжения

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2} = \sqrt{106,3^2 + 35,4^2 + 21,26^2} = 114 \text{ в.}$$

Мощность, развиваемая несинусоидальным током, равна сумме мощностей, развиваемых отдельными гармониками тока. Если активное сопротивление цепи равно R , то мощность, расходуемая в цепи,

$$P = I_0^2 R + I_1^2 R + I_2^2 R + \dots + I_k^2 R = (I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2) R = I^2 R, \quad (464)$$

т. е. мощность равна произведению квадрата действующего значения несинусоидального тока на активное сопротивление.

Но эту же мощность можно выразить формулой

$$P = UI \cdot \cos \varphi,$$

где U — действующее значение несинусоидального напряжения;
 I — действующее значение тока;
 $\cos \varphi$ — эквивалентный коэффициент мощности.

Пример 189. К цепи, состоящей из последовательно соединенных активного сопротивления $r = 40$ ом и индуктивности $L = 0,03$ гн, приложено несинусоидальное напряжение $u = 40 + 84,6 \cdot \sin \omega t + 28,2 \cdot \sin 3 \omega t$.

Определить мгновенное и действующее значения тока в данной цепи, а также действующее значение напряжения и активную мощность, развиваемую током в ней, если угловая частота первой (основной) гармоники $\omega = 1000 \frac{1}{\text{сек}}$.

Решение. Нулевая гармоника напряжения создает постоянную составляющую тока, равную

$$i_0 = I_0 = \frac{U_0}{r} = \frac{40}{40} = 1 \text{ а.}$$

Первая гармоника напряжения создает ток в цепи, амплитуда которого равна

$$I_{1m} = \frac{U_{1m}}{Z_1} = \frac{U_{1m}}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} = \frac{84,6}{\sqrt{40^2 + (1000 \cdot 0,03)^2}} = 1,692 \text{ а.}$$

Действующее значение тока первой гармоники равно

$$I_1 = \frac{I_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{1,692}{1,41} = 1,2 \text{ а.}$$

Сдвиг фаз напряжения и тока первой гармоники находим по его тангенсу

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{X_1}{r} = \frac{1000 \cdot 0,03}{40} = 0,75,$$

откуда по тригонометрическим таблицам находим

$$\varphi_1 = 36^\circ 50'.$$

Мгновенное значение тока первой гармоники равно

$$i_1 = I_{1m} \cdot \sin(\omega t - \varphi_1) = 1,692 \cdot \sin(1000t - 36^\circ 50').$$

Третья гармоника напряжения создает ток в цепи, амплитуда которого равна

$$I_{3m} = \frac{U_{3m}}{Z_3} = \frac{U_{3m}}{\sqrt{r^2 + (3\omega L)^2}} = \frac{28,2}{\sqrt{40^2 + (3 \cdot 1000 \cdot 0,03)^2}} = 0,283 \text{ а.}$$

Действующее значение тока третьей гармоники равно

$$I_3 = \frac{I_{3m}}{\sqrt{2}} = \frac{0,283}{1,41} \approx 0,2 \text{ а.}$$

Сдвиг фаз напряжения и тока третьей гармоники находим по его тангенсу

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = \frac{X_3}{r} = \frac{3 \cdot 1000 \cdot 0,03}{40} = 2,25,$$

откуда по тригонометрическим таблицам находим

$$\varphi_3 \approx 66^\circ.$$

Мгновенное значение тока третьей гармоники равно

$$i_3 = I_{3m} \cdot \sin(3\omega t - \varphi_3) = 0,2 \cdot \sin(3000t - 66^\circ).$$

Мгновенное значение несинусоидального тока определяется по формуле

$$i = I_0 + i_1 + i_3 = 1 + 1,692 \cdot \sin(1000t - 36^\circ 50') + 0,2 \cdot \sin(3000t - 66^\circ).$$

Действующее значение несинусоидального тока равно

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_3^2} = \sqrt{1^2 + 1,2^2 + 0,2^2} = 1,58 \text{ а.}$$

Активная мощность, развиваемая несинусоидальным током в цепи, равна

$$P_a = I^2 r = 1,58^2 \cdot 40 = 99,2 \text{ вт.}$$

§ 149. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕПИ ПРИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОМ ПРИЛОЖЕННОМ НАПРЯЖЕНИИ

Пусть задана цепь, состоящая из последовательно соединенных r , L и C . К ней приложено некоторое несинусоидальное напряжение, например:

$$u = U_{1m} \cdot \sin \omega t + U_{3m} \cdot \sin 3\omega t + U_{5m} \cdot \sin 5\omega t.$$

Полное сопротивление цепи зависит от величин r , L , C и частоты, а поэтому оно различно для различных гармоник.

Для первой гармоники оно равно

$$Z_1 = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2};$$

для третьей гармоники

$$Z_3 = \sqrt{r^2 + \left(3\omega L - \frac{1}{3\omega C}\right)^2};$$

для пятой гармоники

$$Z_5 = \sqrt{r^2 + \left(5\omega L - \frac{1}{5\omega C}\right)^2}$$

и т. д.

При некоторых значениях емкости C и индуктивности L для какой-либо из гармоник, например k -й, индуктивное сопротивление цепи может оказаться равным емкостному сопротивлению ее:

$$k\omega L = \frac{1}{k\omega C}. \quad (465)$$

В этом случае полное сопротивление цепи для k -й гармоники будет равно активному сопротивлению цепи, т. е. $Z_k = r$, ток k -й гармоники достигнет максимального значения и может превысить значения токов всех остальных гармоник. Тогда возникает резонанс напряжений k -й гармоники со всеми присутствующими явлениями.

Пример 190. К цепи, обладающей емкостью $C = 2$ мкф, индуктивностью $L = 0,02$ гн и активным сопротивлением $r = 0,1$ ом, приложено несинусоидальное напряжение

$$u = 162,2 \cdot \sin \omega t + 18,1 \cdot \sin 3\omega t + 6,5 \cdot \sin 5\omega t + 3,3 \cdot \sin 7\omega t,$$

где $\omega = 1000 \frac{1}{\text{сек}}$.

Определить амплитуду гармоник тока в данной цепи.

Решение. Реактивные сопротивления для гармоник:

1. Для первой гармоники

$$X_1 = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 1000 \cdot 0,02 - \frac{1}{1000 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = -480 \text{ ом.}$$

2. Для третьей гармоники

$$X_3 = 3\omega L - \frac{1}{3\omega C} = 3 \cdot 1000 \cdot 0,02 - \frac{1}{3 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = -106 \text{ ом.}$$

3. Для пятой гармоники

$$X_5 = 5\omega L - \frac{1}{5\omega C} = 5 \cdot 1000 \cdot 0,02 - \frac{1}{5 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 0.$$

4. Для седьмой гармоники

$$X_7 = 7\omega L - \frac{1}{7\omega C} = 7 \cdot 1000 \cdot 0,02 - \frac{1}{7 \cdot 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} \approx 69 \text{ ом.}$$

Амплитуды гармоник тока:

1. Для первой гармоники

$$I_{1m} = \frac{U_{1m}}{Z_1} = \frac{162,2}{\sqrt{0,1^2 + 480^2}} = 0,34 \text{ а.}$$

2. Для третьей гармоники

$$I_{3m} = \frac{U_{3m}}{Z_3} = \frac{18,1}{\sqrt{0,1^2 + 106^2}} = 0,17 \text{ а.}$$

3. Для пятой гармоники

$$I_{5m} = \frac{U_{5m}}{Z_5} = \frac{6,5}{0,1} = 65 \text{ а.}$$

4. Для седьмой гармоники

$$I_{7m} = \frac{U_{7m}}{Z_7} = \frac{3,3}{\sqrt{0,1^2 + 69^2}} = 0,048 \text{ а.}$$

Для пятой гармоники будет резонанс напряжений. Ее ток значительно превышает токи всех остальных гармоник, взятых в отдельности.

Напряжение, приложенное к емкости и индуктивности, в силу возникшего резонанса напряжений пятой гармоники значительно превосходит действующее значение напряжения, приложенного ко всей цепи:

$$U_{5L} = U_{5C} = I k \omega L = 65 \cdot 5 \cdot 1000 \cdot 0,02 = 6500 \text{ в.}$$

При несинусоидальной форме кривой напряжения, приложенного к цепи, может быть столько случаев резонанса напряжений, сколько гармоник содержит в себе несинусоидальное напряжение, приложенное к цепи. Изменяя плавно в этой цепи какую-либо из величин, например емкость, можно снять кривую так называемого сложного резонанса (рис. 338).

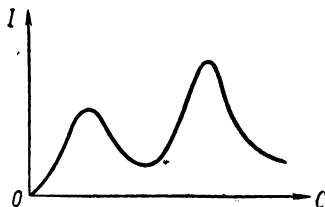


Рис. 338. Кривая сложного резонанса

§ 150. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРАХ

В технике проводной связи, при телефонировании и телеграфировании, широко применяется одновременная работа по одной и той же линии при помощи переменных токов различных частот. Например, по одной паре бронзовых проводов, помимо обычных телефонных разговоров на частотах от 200 до 3000 гц, можно осуществить несколько телеграфных передач на частотах от 3000 до 10 000 гц и далее вновь телефонные разговоры на высоких частотах от 10 000 до 40 000 гц. При этом отдельные одновременно ведущиеся передачи протекают без каких-либо помех друг другу.

Уплотнение телефонно-телеграфных передач по одной и той же паре проводов дает значительную экономию проводов и расширяет эксплуатационные возможности телефонно-телеграфных установок.

Для многократного телефонирования и телеграфирования применяются дополнительные приборы, называемые электрическими фильтрами. Электрические фильтры разделяют на конце линии одни частоты от других и направляют каждую в свой аппарат. Эти фильтры широко используются и в других отраслях электротехники, например в радиотехнике, в технике сильных токов и т. п.

Принцип действия фильтров основан на свойстве индуктивности задерживать токи высших частот и пропускать токи низ-

ших частот и постоянную составляющую тока, а также на свойстве емкости пропускать токи высших частот, задерживать токи низших частот и совершенно не пропускать постоянной составляющей тока.

Всякий фильтр представляет собой комбинацию емкости C и индуктивности L , дающую возможность пропустить к аппарату какую-либо одну из частот или полосу частот и задержать все остальные или, наоборот, пропустить все частоты, кроме заданной.

Рассмотрим наиболее типичные схемы электрических фильтров.

Фильтры нижних частот

Фильтры нижних частот пропускают токи частот ниже определенной заданной частоты.

На рис. 339 приведена схема Т-образного фильтра нижних частот, содержащего в себе катушки индуктивности L_1 и L_2 и конденсатор C . Токи низких частот легко проходят через катушки индуктивности и с трудом — через конденсатор. Наоборот, токи

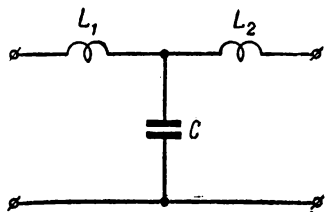


Рис. 339. Схема Т-образного фильтра нижних частот



Рис. 340. Характеристика фильтра нижних частот

высоких частот легко проходят через конденсатор и задерживаются катушками. Поэтому фильтр нижних частот оказывает возрастающее сопротивление токам всех частот выше резонансной.

На рис. 340 приведена характеристика фильтра нижних частот. По горизонтальной оси отложены частоты f , а по вертикальной — величины тока I , соответствующие данным частотам.

Фильтры верхних частот

Фильтры верхних частот пропускают токи частот выше некоторой определенной заданной частоты.

На рис. 341 приведена Т-образная схема фильтра верхних частот, содержащего конденсаторы C_1 и C_2 и катушку индуктивности L .

Токи высоких частот легко проходят через конденсаторы и с трудом — через катушку индуктивности. Наоборот, токи низ-

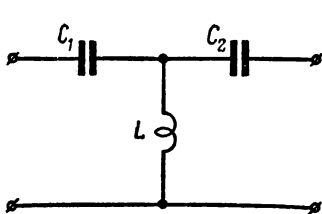


Рис. 341. Схема Т-образного фильтра верхних частот



Рис. 342. Характеристика фильтра верхних частот

ких частот легко проходят через катушку индуктивности и задерживаются конденсаторами. Вследствие этого фильтр высокой частоты оказывает все возрастающее сопротивление токам всех частот меньше резонансной.

На рис. 342 приведена характеристика фильтра верхних частот. Здесь мы видим, что с ростом частоты ток, пропускаемый фильтром, возрастает.

Полосовые фильтры

Полосовые фильтры пропускают определенную частоту или полосу частот, задерживая все остальные частоты.

На рис. 343 изображена схема простейшего полосового фильтра, состоящего из последовательно соединенных катушки индуктивности и конденсатора. Подобный фильтр свободно пропускает ток частоты, совпадающей с его резонансной частотой

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

задерживая в той или иной степени токи других частот.

На рис. 344 показана характеристика полосового фильтра. Из этой характеристики видно, что чем более пологая резонансная кривая, тем большую полосу частот пропускает фильтр. Это не всегда желательно, особенно в тех случаях, когда нужно эту полосу частот свести к минимуму или, например, пропустить только определенную частоту. В этом случае схему полосового фильтра усложняют.

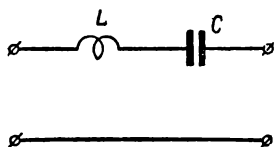


Рис. 343. Схема простейшего полосового фильтра

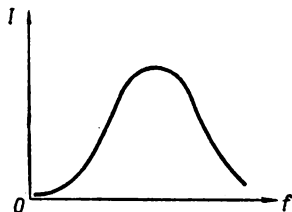


Рис. 344. Характеристика полосового фильтра

На рис. 345 приведена схема полосового фильтра, состоящая из двух катушек индуктивности и двух конденсаторов. Участок цепи с индуктивностью L_1 и последовательно соединенной с ней емкостью C_1 настраивают на резонанс напряжений для частоты, которую желают пропустить к аппарату. Контур, имеющий индуктивность L_2 и емкость C_2 , настраивают на резонанс токов заданной частоты, так что этот контур оказывает очень большое сопротивление. В результате фильтр будет пропускать строго определенную частоту, все же остальные частоты, более высокие и низкие, чем резонансная, не будут допущены к тому или иному прибору.

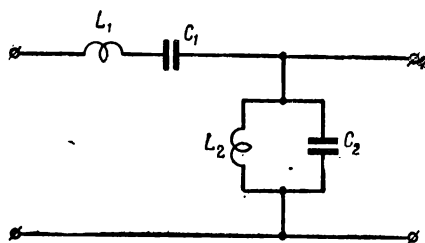


Рис. 345. Схема полосового фильтра

Заграждающие фильтры

Заграждающие фильтры задерживают токи определенной частоты или полосы частот и пропускают токи всех частот, лежащих за пределами этой полосы.

На рис. 346 показана простейшая схема заграждающего фильтра. Здесь контур с емкостью C_1 и индуктивностью L_1 настраивается на резонанс токов для некоторой заданной частоты, которую желают задержать, не допустить в аппарат.

Участок цепи с индуктивностью L_2 и емкостью C_2 настраивают на резонанс напряжений заданной частоты. Следовательно, заданная частота встречает очень большое сопротивление в контуре L_1 и C_1 и незначительное — в ответвлении L_2 , C_2 , благодаря чему колебания этой частоты отсеиваются, не заходя в приемник. Все же остальные частоты более или менее свободно проходят в приемник.

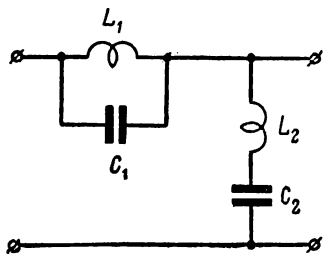


Рис. 346. Простейшая схема заграждающего фильтра

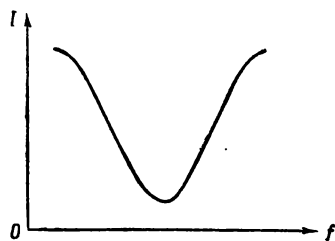


Рис. 347. Характеристика заграждающего фильтра

На рис. 347 показана характеристика заграждающего фильтра. Чем более пологая кривая характеристики фильтра, тем большую полосу частот задерживает фильтр.

ГЛАВА XXVIII ВЫПРЯМИТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 151. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Выпрямителями переменного тока называются приборы, преобразующие переменные токи в токи постоянные или пульсирующие.

В современной электротехнике, и в частности в технике связи, применяются разнообразные типы выпрямителей переменного тока, например кенотроны, ртутные и полупроводниковые выпрямители, вибропреобразователи и некоторые иные.

Большинство выпрямителей переменного тока, применяемых на практике, являются электрическими вентилями, т. е. приборами, которые обладают практически односторонней проводимостью. Ток одного направления (прямой ток) проходит через них относительно свободно,

а ток противоположного направления (обратный ток) — очень слабо. Например, кенотрон пропускает через себя ток только в направлении от анода к катоду, селеновый выпрямитель — от селена к катодному сплаву и т. д. На рис. 348 показано условное изображение полупроводникового (твердого) выпрямителя переменного тока. Здесь острие стрелки показывает направление тока через выпрямитель (направление прямого тока).

В нормальных условиях эксплуатации обратный ток в выпрямителях переменного тока настолько мал по сравнению с прямым током, что им практически можно пренебречь. Однако в том случае, когда на выпрямитель подается переменное напряжение, превышающее номинальное, обратный ток становится ощутимым, и при некотором предельном обратном напряжении выпрямитель пробивается и теряет свое вентильное свойство.

Основными характеристиками выпрямителей переменного тока являются: допустимая температура, плотность тока и допустимое обратное напряжение на вентильный элемент.

В последующих параграфах мы познакомимся с некоторыми типами выпрямителей и их основными характеристиками.



Рис. 348. Схематическое изображение выпрямителя

§ 152. КЕНОТРОН

На рис. 349, *а* показана схема устройства двухэлектродной электронной выпрямительной лампы, называемой кенотроном. Кенотрон состоит из стеклянного баллона, внутри которого создано высокое разрежение воздуха. В баллоне помещены два электрода, из которых один называется анодом, а другой катодом. Анодом служит металлический цилиндр, изготовляемый обычно из никеля, тантала или молибдена. Катод, помещенный внутри цилиндрического анода, представляет собой тонкую металлическую нить, изготовляемую обычно из вольфрама. Из баллона лампы выведены три проводника, из которых два — это концы нити катода и один — проводник, присоединенный к аноду. Все три выводных проводника припаяны к соответствующим штырькам, впрессованным в цоколе лампы.

На рис. 349, *б* показана принципиальная схема двухэлектродной электронной лампы с подключенными к ней анодной B_A и накальной B_n батареями. Рассмотрим применительно к этой схеме, в чем заключается принцип вентильного действия двухэлектродной электронной лампы.

Катод лампы K питается током от батареи накала B_n . Ток, проходя через нить катода, нагревает ее, и она получает способность излучать в окружающее пространство электроны. Вылетевшие с поверхности катода электроны образуют вокруг него нечто вроде электронного облачка, создающего пространственный объемный заряд.

Анод лампы соединен с положительным полюсом анодной батареи B_A , другой полюс которой присоединен к катоду лампы, поэтому между анодом и катодом лампы имеется некоторая разность потенциалов, равная напряжению на зажимах анодной батареи B_A . Следовательно, в пространстве между анодом A и

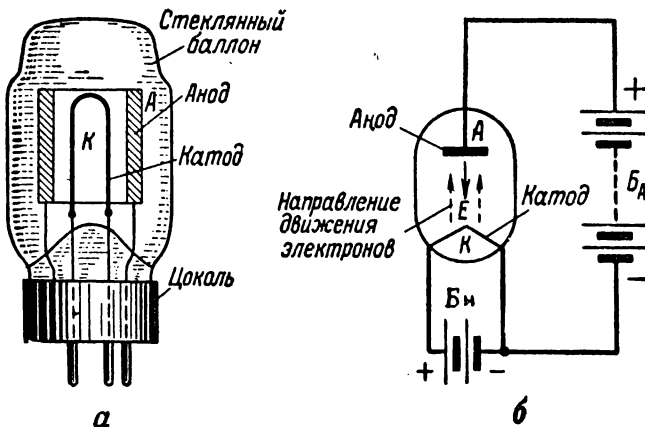


Рис. 349. Кенотрон

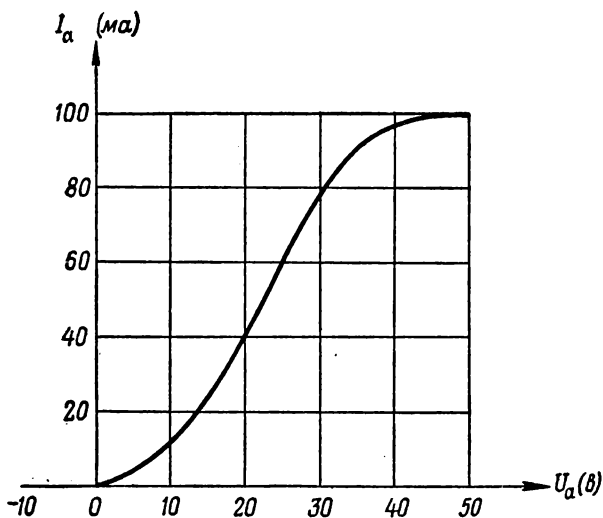


Рис. 350. Характеристика кенотрона

катодом K лампы имеется электрическое поле E , направленное от анода к катоду.

Электроны, вырвавшиеся с поверхности катода, под влиянием сил электрического поля движутся к аноду A и, осаждаясь на его поверхности, компенсируют положительные заряды анода. Если убыль электронов на катоде и убыль положительных зарядов на аноде будут пополняться от анодной батареи B_A , то электроны с катода станут непрерывным потоком перемещаться внутри лампы, т. е. через лампу будет проходить термоионный электрический ток, называемый анодным током.

Зависимость анодного тока в электронной лампе от анодного напряжения при постоянном токе накала нити лампы является одной из основных характеристик двухэлектродной электронной лампы. На рис. 350 изображена кривая этой зависимости. Здесь по горизонтальной оси отложено анодное напряжение U_a в вольтах, а по вертикальной оси — анодный ток I_a в миллиамперах. Из этой кривой видно, что между напряжением U_a и током I_a не существует прямой пропорциональной зависимости. Анодный ток, соответствующий анодному напряжению в диапазоне от нуля до нескольких вольт, растет очень медленно и неравномерно. Затем, с ростом напряжения примерно до нескольких десятков вольт, анодный ток увеличивается более быстро и притом равномерно и пропорционально анодному напряжению. И, наконец, с дальнейшим ростом анодного напряжения интенсивность роста анодного тока спадает. Кривая роста тока круто поворачивает вправо и, загибаясь, становится почти горизонтальной. То предельное значение, которого достигает анодный

ток при своем увеличении с ростом анодного напряжения, называется током насыщения.

Сложную зависимость анодного тока I_a от анодного напряжения U_a можно объяснить следующим образом.

Когда анодное напряжение равно нулю, то анод не имеет положительного потенциала, электроны, вылетающие с катода лампы, не притягиваются анодом и образовавшееся вокруг катода электронное облачко отталкивает электроны, вылетающие с поверхности катода. С увеличением напряжения на аноде он заряжается положительно и притягивает к себе часть электронов из электронного облачка, т. е. в цепи создается анодный ток. Но при анодном напряжении от 0 до 10 в анодный ток мал, так как еще очень слабо электрическое поле внутри лампы и электронное облачко оказывает большое противодействие вылету электронов с катода лампы. При увеличении напряжения от 10 до 50 в электрическое поле сильно растет, электронное облачко частично рассеивается, электроны получают возможность более свободно вылетать с катода лампы и анодный ток увеличивается. При дальнейшем увеличении анодного напряжения от 50 до 80 в электрическое поле становится настолько сильным, что электронное облачко совершенно исчезает и электроны, покидающие катод, беспрепятственно достигают анода. Дальнейшее увеличение напряжения не увеличивает анодного тока, так как все вылетающие с катода электроны попадают на анод, и в анодной цепи устанавливается ток насыщения. Если необходимо дальше увеличивать анодный ток, то надо увеличить эмиссию, или излучение электронов с катода, повысив температуру его путем увеличения тока накала.

Теперь изменим полярность электродов электронной лампы, подключив к электроду A лампы отрицательный полюс анодной батареи B_A , а к электроду K — положительный полюс ее. В этом случае электроны, вылетающие из накаленной нити лампы, не только не будут притягиваться электродом A , но даже станут отталкиваться от него. Следовательно, направленного движения потока электронов внутри лампы от электрода K к электроду A не будет, а это значит, что электрический ток в цепи батареи B_A — лампа протекать не будет. Таким образом, двухэлектродная электронная лампа (кенотрон) обладает вентильными свойствами, т. е. способностью пропускать через себя ток только в том случае, если на ее электрод A (анод) подан положительный потенциал, а на электрод K (катод) — отрицательный потенциал от анодной батареи B_A .

Если к электродам кенотрона подключить переменное синусоидальное напряжение, то при подаче на анод положительной полуволны напряжения (потенциала) в кенотроне будет проходить анодный ток, а при подаче отрицательной полуволны тока не будет.

На рис. 351 показана схема двухэлектродного кенотрона, подключенного к источнику электрической энергии с синусоидальной электродвижущей силой. На рис. 352 показаны синусоида напряжения, подаваемого на электроды кенотрона, и график коммутированного напряжения U на активном сопротивлении R , включенном в анодную цепь лампы.

Нетрудно видеть, что ток во внешней цепи кенотрона (рис. 351) проходит от нити лампы (катода) через нагрузочное сопротивление R к аноду лампы.

Следовательно, кенотрон, включенный в цепь переменного тока, можно рассматривать по отношению к нагрузочному сопротивлению R (потребителю) как источник пульсирующего тока, т. е. переменного по величине, но неизменного по направлению тока. При этом катод кенотрона служит положительным, а анод — отрицательным полюсом этого источника.

Существенный недостаток схемы однополупериодного выпрямителя переменного синусоидального тока заключается в том, что здесь использована только одна положительная полуволна подаваемого на электроды синусоидального напряжения, в результате чего постоянная составляющая выпрямленного напряжения относительно мала:

$$U = 0,318 U_m, \quad (466)$$

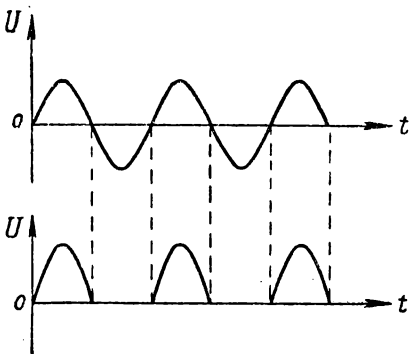


Рис. 352. Однополупериодное выпрямление переменного синусоидального напряжения двухэлектродным кенотроном

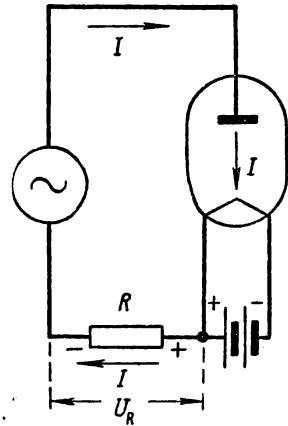


Рис. 351. Схема включения двухэлектродного кенотрона в сеть переменного тока

где U — постоянная составляющая выпрямленного напряжения;

U_m — амплитуда пульсирующего напряжения.

Для улучшения работы кенотрона применяются схемы с двухполупериодным выпрямлением — с двумя спаренными кенотронами или с одним кенотроном, имеющим два анода и один катод (двуханодный кенотрон).

На рис. 353 приведена одна из практических схем двухполупериодного выпрямления с помощью двуханодного кенотрона.

Здесь кенотронный выпрямитель получает электрическую энергию от сети переменного тока через первичную обмотку силового трансформатора Tr . Понижающая вторичная обмотка трансформатора, имеющая на своих выходных зажимах напряжение в несколько вольт, питает переменным током нить накала кенотрона. Повышающая вторичная обмотка, имеющая на зажимах напряжение обычно в несколько сот вольт, подключена к кенотрону так, что один из ее концов присоединен к первому 1, а другой — ко второму 2 аноду лампы. Средняя же точка этой обмотки соединена через нагрузочное сопротивление R с катодом кенотрона. Таким образом, повышающая обмотка трансформатора разделена на две секции, из которых каждая связана с анодной цепью кенотрона только через свой анод.

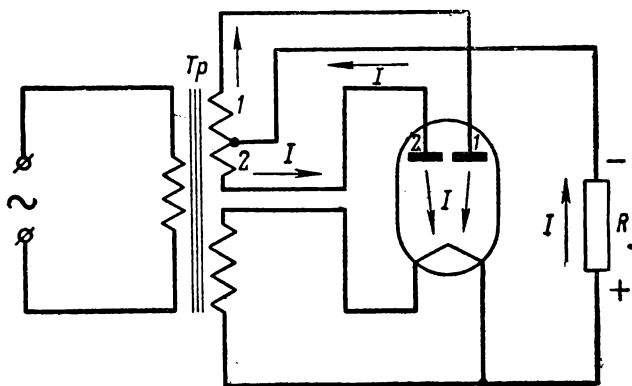


Рис. 353. Схема двухполупериодного выпрямления с помощью двуханодного кенотрона

Если одна из секций повышающей обмотки трансформатора, например секция 1, подает на свой анод 1 положительный потенциал, то в это же время секция 2 подает на свой анод 2 отрицательный потенциал. Спустя некоторое время, наоборот, секция 1 будет подавать на свой анод 1 отрицательный потенциал, а секция 2 — подавать на свой анод 2 положительный потенциал. В результате этого попеременно будут выпрямляться как положительная, так и отрицательная полуволны синусоидального напряжения (рис. 354).

Постоянная составляющая коммутированной синусоиды при двухполупериодном выпрямлении равна

$$U = 0,636 U_m, \quad (467)$$

где U — постоянная составляющая коммутированной синусоиды напряжения;

U_m — амплитуда пульсирующего напряжения.

Так как на каждый из анодов двуханодного кенотрона подается только половина электродвижущей силы, индуктированной в повышающей обмотке силового трансформатора, то соответственно этому и выпрямленное напряжение, подаваемое кенотроном на потребитель, будет заниженным.

Чтобы повысить его, применяют схемы с четырьмя однополупериодными кенотронами. Здесь за один полупериод работают два соединенных последовательно кенотрона, а за другой полупериод — два других кенотрона.

Таким образом, потребитель получает напряжение вдвое большее по сравнению с тем, которое он получал бы от двухполупериодного кенотрона.

Кенотрон подает на нагрузочное сопротивление пульсирующее напряжение, содержащее постоянную и переменную составляющие. Однако для питания, например, анодных цепей радиоприемника требуется постоянный ток, т. е. ток, не изменяющийся во времени по величине. Следовательно, возникает необходимость как-то отсеять от пульсирующего тока его переменную составляющую, не допустить ее в нагрузочное сопротивление кенотрона, пропу-

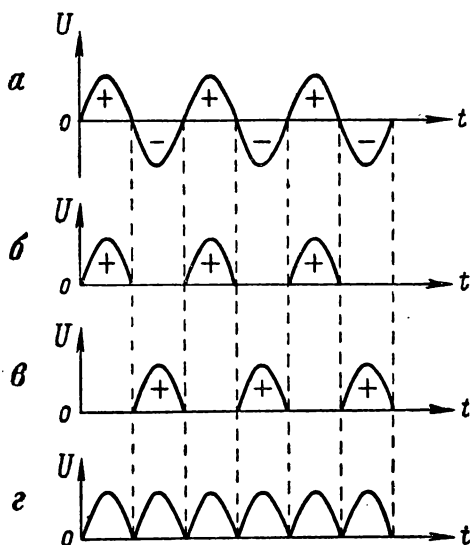


Рис. 354. Двухполупериодное выпрямление переменного синусоидального напряжения двуханодным кенотроном:

а — напряжение трансформатора; *б* — напряжение, выпрямленное первым анодом; *в* — напряжение, выпрямленное вторым анодом; *г* — напряжение на нагрузочном сопротивлении

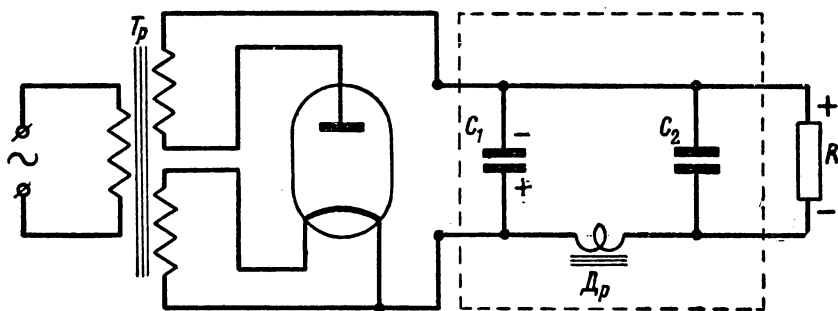


Рис. 355. Принципиальная схема кенотронного выпрямителя со сглаживающим фильтром

стив туда только постоянную составляющую. Для этой цели применяются сглаживающие фильтры, включаемые между кенотроном (выпрямителем) и нагрузочным сопротивлением.

На рис. 355 показана принципиальная схема кенотронного выпрямителя со сглаживающим фильтром, где схема фильтра выделена пунктирной четырехугольной рамкой.

Сглаживающий фильтр состоит из дроссельной катушки Dp и конденсаторов C_1 и C_2 .

Дроссельная катушка Dp имеет стальной сердечник, обычно с воздушным зазором; на сердечник насажена обмотка, имеющая несколько тысяч витков проволоки. Такой дроссель низкой частоты имеет индуктивность порядка 20—30 гн.

Конденсаторы сглаживающего фильтра, из которых один подключается параллельно выходу кенотрона, а другой — параллельно нагрузочному сопротивлению R кенотрона, обычно имеют большую емкость — 10 мкф и больше. Для этой цели чаще всего применяют электролитические конденсаторы, обладающие большими емкостями и в то же время относительно небольшими размерами и весом.

Необходимо напомнить, что электролитические конденсаторы имеют строго определенную полярность, т. е. они играют роль конденсатора только в том случае, когда плюс источника электрической энергии, в данном случае кенотрона, соединен с положительным полюсом конденсатора (центральный вывод конденсатора), а минус — с отрицательным (с корпусом конденсатора). В этом случае постоянная составляющая пульсирующего тока, создаваемого кенотроном, не проходит через конденсатор.

Конденсатор C_1 , подключенный параллельно выходу кенотрона, отделяет значительную долю переменной составляющей пульсирующего тока, которая, минуя остальную часть фильтра, замыкается через кенотрон.

Дроссель Dp , как обладающий большим индуктивным сопротивлением, значительно уменьшает проходящую через него переменную составляющую пульсирующего тока и почти беспрепятственно пропускает постоянную составляющую его.

И, наконец, конденсатор C_2 подобно конденсатору C_1 отделяет значительную долю переменной составляющей пульсирующего тока, так что через нагрузочное сопротивление проходит уже практически постоянный ток.

Надо сказать, что конденсатор C_1 сглаживающего фильтра заряжается весьма быстро в тот отрезок времени, когда нарастает подаваемое на него кенотроном пульсирующее напряжение, и, наоборот, разряжается относительно медленно в тот отрезок времени, когда пульсирующее напряжение, подаваемое кенотроном, убывает. Это объясняется тем, что конденсатор не может разрядиться через кенотрон, так как электроны с его обкладки не могут перемещаться от анода к катоду кенотрона. Поэтому единственный путь разряда конденсатора C_1 — это дрос-

сель D_r и нагрузочное сопротивление R . Но эта цепь обладает, как правило, большим сопротивлением из-за нагрузочного сопротивления R , а поэтому разряд конденсатора C_1 протекает относительно медленно. Он еще не успевает разрядиться полностью, как уже снова начинает заряжаться кенотроном до амплитудного значения напряжения. В результате постоянная составляющая выпрямленного напряжения на выходе фильтра повышается. Следовательно, конденсатор C_1 сглаживающего фильтра не только сглаживает пульсацию напряжения, но и повышает его постоянную составляющую.

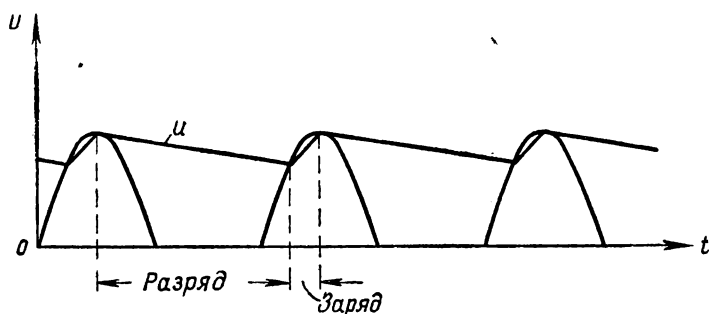


Рис. 356. Графики напряжения на выходе сглаживающего фильтра

На рис. 356 показаны для сравнения графики напряжения на нагрузочном сопротивлении однополупериодного кенотрона, работающего со сглаживающим фильтром и без него.

Сглаживающий фильтр не дает идеального постоянного напряжения на нагрузочном сопротивлении кенотрона. Это объясняется тем, что сопротивление дросселя не является бесконечно большим для переменной составляющей пульсирующего тока и что емкостное сопротивление конденсаторов для этой составляющей не бесконечно мало. Поэтому на нагрузочном сопротивлении создается напряжение с некоторой, правда относительно малой, переменной составляющей.

Для практики считается вполне приемлемым, если фильтр ослабит переменную составляющую пульсирующего напряжения кенотрона примерно в 50 раз. В этом случае напряжение, подаваемое с нагрузочного сопротивления на аноды ламп радиоприемника, не будет создавать звуковой фон переменного тока низкой частоты колебаний в репродукторе приемника.

Чем выше частота пульсирующего тока, тем больше индуктивное сопротивление дросселя и меньше емкостное сопротивление конденсатора для переменной составляющей этого тока и тем лучше работа сглаживающего фильтра. Отсюда следует, что двухполупериодная схема кенотрона (двуханодного кено-

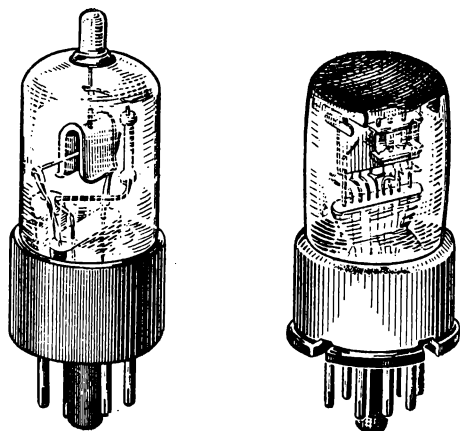


Рис. 357. Кенотроны

трона) дает лучшее выпрямление пульсирующего тока, чем однополупериодная, так как в первом случае частота переменной составляющей этого тока в два раза больше, чем во втором случае.

Кенотрон обладает сравнительно большим внутренним сопротивлением — в несколько сотен или тысяч ом. Следовательно, его надо рассматривать как источник пульсирующего тока со сравнительно большим внутренним сопротивлением. Величина напряжения на зажимах кенотрона сильно зависит от

его нагрузки из-за относительно большого падения напряжения внутри кенотрона. Если нагрузка (ток) кенотрона мала, что бывает при большом внешнем сопротивлении, то напряжение на выходных зажимах становится относительно большим и возникает опасность пробоя конденсаторов фильтра. Эта опасность особенно возрастает при холостом ходе выпрямителя, когда он не дает тока во внешнюю цепь. Отсюда следует весьма важный практический вывод: **выпрямитель никогда не следует включать под напряжение электросети без нагрузки.**

« Таблица 36

Основные данные некоторых типов кенотронов

Тип кенотрона	Число анодов	Напряжение накала, в	Ток накала, а	Максимально допустимый выпрямленный ток, ма	Максимально допустимая амплитуда обратного напряжения, в	Среднее внутреннее сопротивление на анод, ом
5Ц4С	2	5,0	2,0	125	1350	150
6Х6С	2	6,3	0,3	16	420	500
1Ц1	1	0,7	0,185	1,0	10 000	6000

На рис. 357 показан внешний вид кенотронов типа 1Ц1С и 6Х6С.

§ 153. РТУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Ртутный выпрямитель, изображенный на рис. 358, состоит из герметически закрытой стеклянной или металлической колбы, наполненной парами ртути и имеющей четыре электрода. Основные аноды выпрямителя — два верхних электрода A_1 и A_2 , изготовленные из железа или графита. Нижние два электрода

K и A_3 — ртутные, из них электрод K — катод ртутного выпрямителя, а электрод A_3 — вспомогательный анод для зажигания ртутного выпрямителя. Наличие двух анодов A_1 и A_2 обеспечивает двухполупериодное выпрямление переменного тока выпрямителем. Питание от сети переменного тока выпрямитель получает через трансформатор Tr .

Один из проводов, по которым подается постоянный ток от выпрямителя к потребителю R , подключен к катоду выпрямителя, а другой — к средней точке трансформатора. Вспомогательный электрод A_3 подключен к виткам трансформатора через дополнительное сопротивление r и выключатель B .

Принцип действия ртутного выпрямителя сводится к следующему.

Для того чтобы запустить в ход выпрямитель, необходимо подать переменное напряжение на трансформатор, затем замкнуть выключатель B в цепи вспомогательного электрода A_3 и слегка наклонить колбу выпрямителя, чтобы часть ртути из электрода A_3 перешла к электроду K . Когда оба эти электрода будут электрически соединены тонкой струйкой стекающей ртути, то в цепи со вспомогательным электродом A_3 возникнет электрический ток. При возвращении колбы в вертикальное положение и разрыве ртутной струйки в цепи вспомогательного электрода образуется электрическая дуга, которая перекидывается и на главные электроды A_1 и A_2 . Действие выпрямителя основано на свойстве электрической дуги, возникающей между ртутью и твердым электродом, пропускать ток лишь в направлении от твердого электрода к ртути.

Источником излучения электронов в катоде является светящееся пятно на поверхности ртути. Электроны, вылетевшие с катода, направляются к тому аноду, который в данный момент имеет положительный потенциал. По пути часть электронов сталкивается с молекулами паров ртути и ионизирует их. Положительные ионы движутся под влиянием сил поля к катоду, сталкиваются с ним и передают ему свою кинетическую энергию. Последняя преобразуется в нем в тепловую энергию, и этим поддерживается относительно высокая температура светящегося

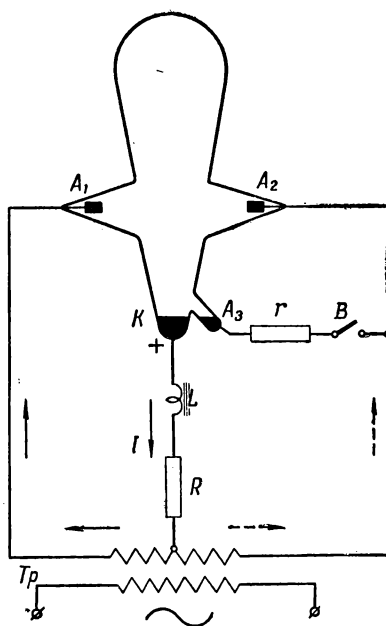


Рис. 358. Схема ртутного выпрямителя

пятна на ртути. Благодаря относительно высокой температуре светящегося пятна (несколько сот градусов) катода и достаточно сильному электрическому полю между катодом и слоем положительных ионов, окружающих катод, создается эмиссия электронов катодом.

Светящееся пятно на катодe и, следовательно, электрическая дуга могут существовать в ртутном выпрямителе только при наличии в нем тока. Выключение тока, даже на весьма малое время, связано с прекращением работы выпрямителя. Чтобы его вновь заставить работать, необходимо заново повторить пусковой процесс зажигания электрической дуги. Электрическая дуга ртутного выпрямителя может погаснуть и при наличии в нем тока, если он станет меньше минимального, в несколько ампер. Для бесперебойной работы выпрямителя при резко изменяющейся нагрузке в мощных ртутных выпрямителях введены вспомогательные электроды, работающие на некоторое постоянное сопротивление. В этих же целях в схеме ртутного выпрямителя предусмотрен дроссель L (рис. 358), который сглаживает пульсацию выпрямленного тока и препятствует быстрому спаду тока, когда переменный ток проходит нулевое значение.

На рис. 359 показана вольтамперная характеристика ртутного выпрямителя. Здесь можно видеть, что при малых напряжениях на выпрямителе между током I и напряжением U существует линейная зависимость (участок кривой oa). При этом режиме скорость движения электронов внутри колбы выпрямителя относительно мала из-за слабого электрического поля и поэтому ионизация молекул ртути практически отсутствует. Ток в выпрямителе обусловлен только потоком электронов, движущихся от катода к аноду. Дальнейший рост напряжения от точки a до точки b не влияет на величину тока в выпрямителе, так как при данном напряжении ток, обусловленный эмиссией электронов катодом, достигает насыщения, т. е. все электроны, излучаемые

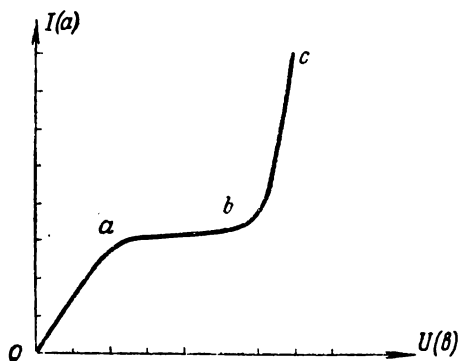


Рис. 359. Вольтамперная характеристика ртутного выпрямителя

катодом, попадают на анод. Однако при данном режиме электроны еще не достигают такой скорости движения, при которой они смогли бы осуществить ионизацию молекул ртути. Когда же напряжение на выпрямителе достигает величины, соответствующей точке b на кривой abc , наступает процесс ионизации молекул ртути, сопровождаемый резким увеличением тока в выпрямителе. Теперь ток I снова изменяется по линейному

закону в зависимости от напряжения U (участок bc), но крутизна подъема его значительно больше, чем на участке oa .

Ртутные выпрямители широко применяются в электротехнике. Они обладают рядом положительных свойств. Их коэффициент полезного действия доходит до 80—85%. Они могут выпрямлять очень большие токи, в сотни или даже тысячи ампер. Падение напряжения в них практически не зависит от величины нагрузки.

Однако наряду с этим ртутные выпрямители имеют ряд существенных недостатков. Они чувствительны к перегрузкам, прекращают работу при малой нагрузке (2—3 a) из-за прекращения эмиссии катодом электронов, а при превышении номинального напряжения в них возникает явление обратного зажигания.

§ 154. МЕДНО-ЗАКИСНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Медно-закисные выпрямители относятся к категории полупроводниковых (твердых) выпрямителей переменного тока.

На рис. 360 схематически изображено устройство медно-закисного выпрямительного элемента. Он состоит из медного диска 1 толщиной 1—1,5 мм, играющего роль катода выпрямительного элемента. На одну из сторон диска нанесен путем термической обработки тонкий слой окиси меди 2 толщиной 0,08—0,1 мм, играющий роль анода. К этому слою крепко прижат свинцовый диск 3 толщиной 0,3—0,5 мм, служащий для предохранения окиси меди от повреждения и для электрического контакта с ней. Шайба 4 и радиаторная пластина 5 служат для отвода тепла от выпрямительного элемента. Шайба 6 и трубка 8 изолируют электроды от болта 10, на котором собраны все детали выпрямительного элемента.

Вентильное действие медно-закисного выпрямительного элемента в основном сводится к следующему. В результате термической обработки медного диска между ним и окисью меди образуется запирающий слой толщиной 10^{-4} — 10^{-5} мм, обладающий односторонней проводимостью. Свободные электроны относительно легко проникают через этот слой из медного диска (катода) 1 к окиси меди (аноду) 2, а в обратном направлении в нормальных условиях эксплуатации электроны весьма слабо проходят через этот слой. Это значит, что прямой ток проходит через медно-закисный выпрямительный элемент от окиси меди 2 к меди 1.

На рис. 361 приведена вольтам-

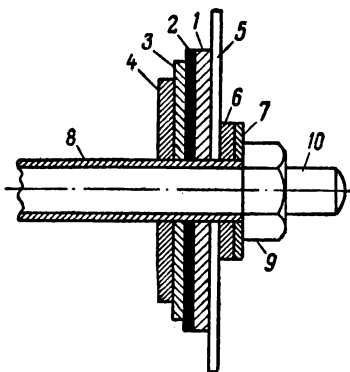
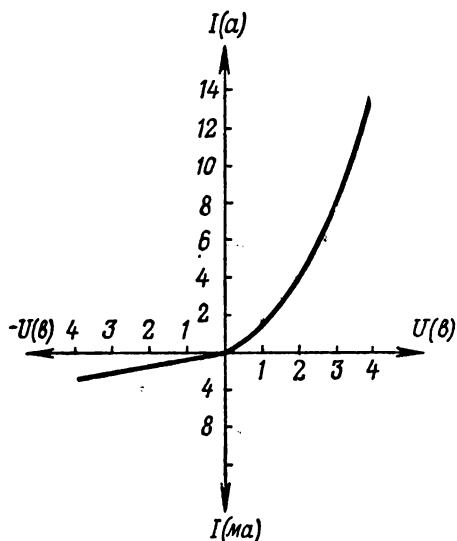


Рис. 360. Медно-закисный выпрямительный элемент

перная характеристика медно-закисного выпрямителя. Так как обратный ток выпрямителя относительно мал, то масштабы прямого и обратного токов взяты различными: масштаб прямого тока — в амперах, а обратного — в миллиамперах на миллиметр.



Напряжение, получаемое от медно-закисного выпрямительного элемента, не превышает 6 в, а поэтому для выпрямления более высоких напряжений эти элементы соединяются последовательно в столбики. На рис. 362 показан внешний вид такого столбика.

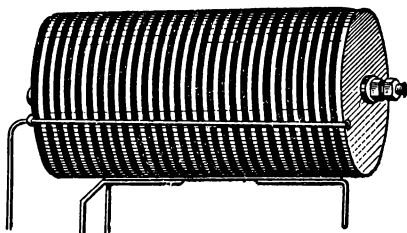


Рис. 361. Вольт-амперная характеристика медно-закисного выпрямителя

Рис. 362. Столбик медно-закисного выпрямителя

Во избежание пробоя полупроводника обратное напряжение в выпрямителе не должно превышать 5—10 в на один элемент.

Плотность тока в медно-закисном выпрямительном элементе при окружающей температуре 20° Ц не должно превышать 0,04 ÷ 0,06 а/см², а при искусственном охлаждении — 0,1 ÷ 0,2 а/см².

Допустимая температура элемента — не выше 50° Ц. С повышением температуры вентиляльные свойства выпрямителя снижаются, а поэтому рекомендуется не переходить за пределы допустимой для элемента температуры.

Коэффициент полезного действия медно-закисных выпрямителей колеблется в пределах 60—70 %.

К достоинствам медно-закисного выпрямителя следует отнести простоту конструкции, удобство эксплуатации и запуска. Недостатки его — малая величина обратного напряжения, боязнь перегрева, низких температур и относительно большой вес.

§ 155. СЕЛЕНОВЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Селеновый выпрямитель относится к категории полупроводниковых (твердых) выпрямителей переменного тока.

На рис. 363 схематически изображено устройство селенового выпрямительного элемента. Он состоит из никелированного стального или алюминиевого диска 1 толщиной 0,7—1,5 мм, покрытого с одной стороны слоем селена 2 толщиной 0,05—0,1 мм. В свою очередь на селен нанесен тонкий покровный слой сплава из кадмия, олова и висмута 3 толщиной 0,05 мм, играющий роль

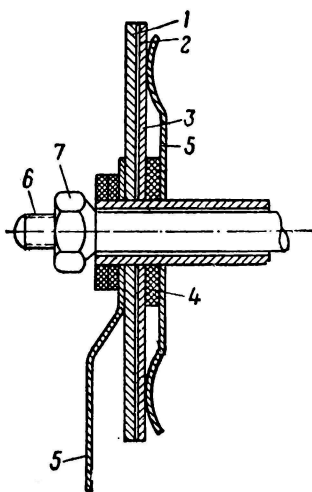


Рис. 363. Селеновый выпрямительный элемент

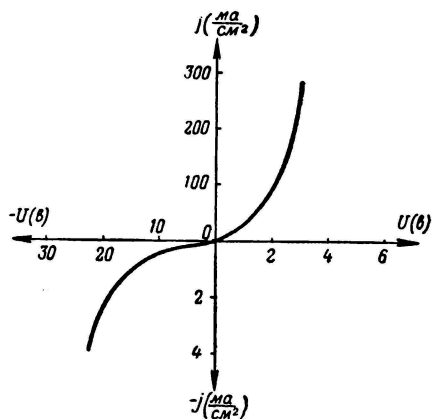


Рис. 364. Вольтамперная характеристика селенового выпрямительного элемента

катода Шайба 4 служит для отвода тепла, а пружины 5 являются токоотводами.

Действие селенового выпрямительного элемента в основном сводится к следующему. Между селеном и покровным слоем 3 имеется запирающий слой толщиной 10^{-4} — 10^{-5} мм, который обладает практически односторонней проводимостью. Свободные электроны относительно легко проникают через него в направлении от покровного слоя (катода) к никелированному диску (аноду), а в обратном направлении в нормальных условиях эксплуатации они проходят через этот слой весьма слабо. Следовательно, прямой ток в селеновом выпрямительном элементе проходит в направлении от никелированного диска к покровному слою.

На рис. 364 приведена вольтамперная характеристика селенового выпрямительного элемента. Так как обратный ток его значительно меньше прямого, то масштабы плотностей этих токов взяты различными, а соответственно этому и масштабы напряжений взяты также различными.

Напряжение, получаемое от одного элемента, не должно превышать 15 в, иначе может появиться сильный обратный ток

(т. е. ток в направлении от катодного сплава к аноду), который может вывести элемент из строя.

Действующее значение допустимого обратного напряжения на элемент не должно превышать 20 в.

Плотность тока при окружающей температуре 20° Ц не должна превышать 0,04—0,05 а/см².

Максимальная допустимая температура — не выше 70° Ц.

Коэффициент полезного действия селенового выпрямителя колеблется в пределах 50—80 %.

Селеновые элементы, соединенные последовательно, образуют селеновые столбики.

Селеновые выпрямители по своим качествам выше, чем медно-закисные. Они рассчитаны на более высокое обратное напряжение, допускают бóльший нагрев и имеют меньший вес и бóльший к. п. д.

Достоинства селеновых выпрямителей — большой срок службы (до 25000 рабочих часов), механическая прочность, простота конструкции, удобство эксплуатации и пуска; недостатки — способность терять вентильные свойства при бездействии в течение нескольких месяцев и увеличение внутреннего сопротивления по мере эксплуатации.

§ 156. ВИБРАЦИОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Вибрационные преобразователи предназначаются для питания анодных цепей радиостанций малой мощности. На рис. 365 приведена принципиальная схема вибропреобразователя. В нее входят три основных элемента: вибратор, состоящий из якоря Я, электромагнита Э и четырех контактов *a*, *b*, *c* и *d*, с которыми

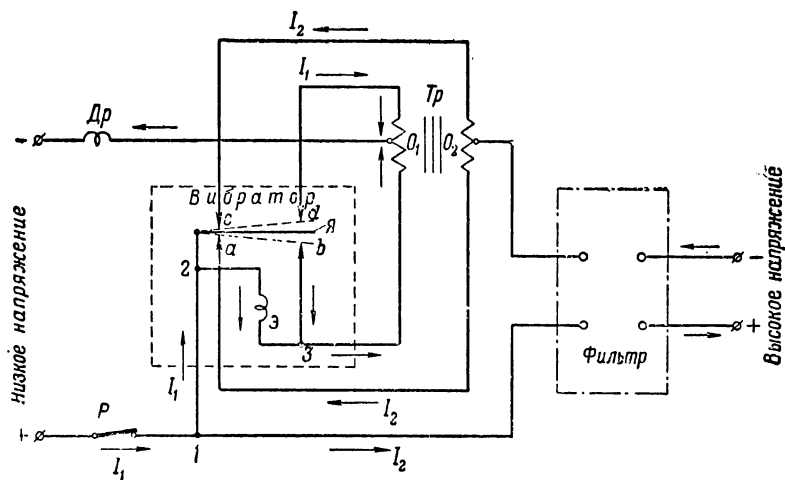


Рис. 365. Принципиальная схема преобразователя

контактирует якорь при своих колебаниях; повышающий трансформатор Tr , обмотки которого имеют выводы от своих средних точек O_1 и O_2 , и фильтр, сглаживающий колебания высокого напряжения, получаемого со вторичной обмотки трансформатора и выпрямленного вибратором.

Вибропреобразователь получает электрическую энергию от аккумуляторной батареи, т. е. питается постоянным током низкого напряжения. Если замкнуть рубильник P , то ток I_1 потечет от плюс-зажима батареи низкого напряжения через обмотку электромагнита \mathcal{E} в нижнюю часть первичной обмотки трансформатора Tr до точки O_1 и отсюда по соединительному проводнику влево через дроссель Dr — к минус-зажиму источника электрической энергии. Под влиянием тока электромагнит \mathcal{E} сработает, притянув к себе якорь вибратора, который, заняв нижнее положение, замкнет контакты a, b и при этом обмотка электромагнита \mathcal{E} будет шунтирована якорем. Тогда ток I_1 от точки 2 пройдет через якорь вибратора, минуя обмотку электромагнита, и через контакт b , точку 3 схемы, соединительный проводник, нижнюю половину первичной обмотки трансформатора, среднюю точку O_1 и дроссель придет к минус-зажиму источника электрической энергии.

Пока в нижней половине первичной обмотки трансформатора ток возрастает, протекая по схеме вверх к точке O_1 , во вторичной обмотке индуцируется ток I_2 , который от средней точки O_2 трансформатора проходит по соединительному проводнику схемы вниз к контакту a вибратора, а отсюда через якорь, точки 2 и 1 схемы, фильтр и плюс-зажим выхода вибропреобразователя — к потребителю и затем возвращается через фильтр к средней точке трансформатора O_2 .

Шунтирование обмотки электромагнита якорем ведет к тому, что катушка теряет свои электромагнитные свойства и якорь в силу своей упругой деформации отрывается от контактов a, b , стремясь занять исходное положение. Но вследствие инерции якорь переходит свое положение устойчивого равновесия, контактирует с контактами c, d вибратора и занимает верхнее положение. Тогда ток I_1 от источника электрической энергии низкого напряжения проходит через рубильник P , точки 1 и 2, якорь $Я$, контакт d и верхнюю половину первичной обмотки трансформатора к средней точке O_1 и отсюда, через дроссель Dr — к минус-зажиму источника электрической энергии. При нарастании тока в верхней половине первичной обмотки трансформатора во вторичной обмотке индуцируется ток I_2 , который идет от средней точки O_2 трансформатора к контакту c вибратора и отсюда через якорь $Я$, точки 2 и 1 — к фильтру и потребителю, а затем возвращается через фильтр к средней точке O_2 трансформатора. Следовательно, в цепи высокого напряжения ток вторичной обмотки трансформатора проходит к потребителю в том же направлении, что и в предыдущем случае, т. е. когда якорь соприка-

сался с контактами a , b , и вибратор выпрямляет ток высокого напряжения, индуктированный во вторичной обмотке трансформатора.

При отрыве якоря от контактов a , b цепь, шунтирующая катушку электромагнита \mathcal{E} , разрывается и электромагнит, действуя на якорь, заставляет его вновь возвратиться в нижнее положение и т. д. В результате якорь совершает механические колебания определенной частоты, а во вторичной обмотке трансформатора происходит непрерывный процесс генерирования тока высокого напряжения, который выпрямляется при помощи вибратора.

ГЛАВА XXIX

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

§ 157. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ УЧЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Современное учение об электромагнитном поле возникло не сразу, а развивалось постепенно, в соответствии с потребностями общества в более интенсивном и разностороннем использовании электрической энергии.

Прошло много веков с тех пор, когда пытливый ум человека впервые среди разнообразнейших явлений природы подметил электрические и магнитные явления.

До XIX века электрические и магнитные явления изучались как совершенно обособленные и не зависимые друг от друга, о внутренней причинной связи их еще ничего не было известно. Это был век, когда в науке безраздельно господствовала метафизика и классическая механика, когда пространство и время считались обособленными категориями, не зависимыми от материального мира, когда признавался принцип дальнего действия как единственно правильная теория, объясняющая механизм взаимодействия материальных тел. Все это наложило свой отпечаток и на учение об электричестве и магнетизме. Например, чтобы объяснить природу магнитных явлений с позиции метафизики и классической механики, понадобилось ввести гипотезу о наличии в природе невесомого вещества — магнетизма, от количества которого зависит сила всякого магнита.

Начало XIX века ознаменовалось рядом открытий в области электромагнитных явлений. Английский физик М. Фарадей открыл в 1831 г. явление электромагнитной индукции. В результате своих исследований в области электромагнитных явлений Фарадей предложил гипотезу, которая и была положена в основу развития учения об электромагнитном поле. Согласно этой гипотезе среда, в которую помещены взаимодействующие электрические заряды, магнитные полюсы или проводники с токами, принимает непосредственное участие в их взаимодействии и является как

бы передаточным звеном в этом физическом процессе. Пространство, в котором размещены взаимодействующие электрические заряды или магнитные полюсы и т. д., находится в состоянии особого напряжения, которое мы можем обнаружить, наблюдая действие электрических и магнитных сил. Чем больше величина этих сил, тем в состоянии большего напряжения, большей деформации находится та среда, в которой наблюдаются эти силы.

Русский академик Э. Х. Ленц открыл один из важнейших законов электромагнитной индукции, вошедший в науку под названием правила Ленца. В своих работах Ленц обосновал глубокую органическую связь между электрическими и магнитными явлениями и этим содействовал укреплению и развитию идеи об электромагнитном поле. Ленц впервые в науке установил принцип обратимости электрических машин и этим способствовал развитию практической электротехники.

Английский физик Максвелл облек в математическую форму идею об электромагнитном поле. Уравнения Максвелла устанавливают математическую зависимость между электрическими и магнитными силами в электромагнитном поле. Решения этих уравнений показали, что электромагнитные возмущения в пространстве должны распространяться волнообразно с некоторой конечной скоростью, зависящей от среды, в которой происходит распространение. Электромагнитные волны, по Максвеллу, должны преломляться и отражаться от поверхностей физических тел так же, как и световые лучи.

Русский физик Н. А. Умов разрешил ряд физических проблем, сыгравших важную роль в развитии учения о распространении электромагнитной энергии в пространстве. Он предложил теорему о том, что «количество энергии, проходящей через элемент поверхности тела в единицу времени, равно силе давления или напряжения, действующей на этот элемент, умноженной на скорость движения элемента». Несколько позднее эта теорема Умова была применена к электромагнитным явлениям.

В области исследования электромагнитных колебаний и их практического применения исключительно велика заслуга русского физика **А. С. Попова** — изобретателя радио. А. С. Попов впервые в мире осуществил в 1895 г. радиотелеграфную передачу и этим положил начало развитию новой отрасли электротехники — радиотехники. Наш народ гордится тем, что родиной радио является наша страна.

Изобретение радио А. С. Поповым весьма ценно в том отношении, что оно органически связало теоретические исследования электромагнитного поля с практикой и этим способствовало грандиозному прогрессу развития радиотехники.

Русский физик П. Н. Лебедев дал ряд весьма важных положений в области теоретического и практического исследования электромагнитных полей. Им впервые был практически установ-

лен факт давления световых лучей, и этим окончательно была доказана справедливость электромагнитной теории света.

«Всю жизнь я воевал с Максвеллом, — говорил Кельвин Тимирязеву, — не признавая светового давления, и Ваш Лебедев заставил меня сдаться перед его опытами».

Исключительно велика заслуга советских ученых в развитии учения об электромагнитных явлениях, в деле исследования вопросов практического применения электромагнитных полей. Мы гордимся именами таких советских ученых, как академики и профессора М. А. Бонч-Бруевич, Н. Д. Папалекси, М. В. Шулейкин, А. А. Чернышев, В. А. Веденский, В. Ф. Миткевич, В. А. Фок, А. М. Берг, члены-корреспонденты Академии наук СССР В. П. Вологдин, А. Н. Шукин и др., которые своими научными трудами и изобретениями в области радио во многих случаях далеко опередили зарубежных ученых и инженеров.

§ 158. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Среди разнообразнейших явлений природы важную роль играют электромагнитные явления.

Особый вид материи, с помощью которого осуществляются электромагнитные явления (электромагнитная форма движения материи), называется электромагнитным полем.

Электромагнитное поле обладает рядом свойств, наглядно подтверждающих его материальную сущность. Например, оно, как и всякое вещественное тело, обладает массой, энергией, количеством движения, производит давление на физические тела, возникает за счет вещества и, наоборот, преобразуется в вещество.

Электромагнитное поле обладает также рядом таких свойств, которые отличают его от вещества. Например, масса свободного электромагнитного поля — не механического происхождения, т. е. свободное электромагнитное поле не имеет массы покоя и вся его масса обусловлена движением. Электромагнитное поле в отличие от вещества проникаемо, т. е. в одном и том же объеме пространства может быть несколько электромагнитных полей, образующих совместно единое электромагнитное поле, напряженность которого определяется как геометрическая сумма напряженностей составляющих полей.

Современная наука установила, что электромагнитное поле как некоторый вид материи обладает одновременно такими противоречивыми свойствами, как прерывность и непрерывность.

Свойство прерывности (корпускулярности) электромагнитного поля проявляется в том, что оно в электромагнитных явлениях выступает как совокупность элементарных невещественных частиц — фотонов (поток фотонов), мчащихся в пространстве со скоростью света. Фотоны в отличие от элементарных вещественных частиц, например электронов, протонов и т. д., не обладают

массой покоя. Они находятся в постоянном движении, и их масса — электромагнитного происхождения. Всякая остановка движения фотона связана с его исчезновением и переходом его массы и энергии в массу и энергию какой-либо иной материальной частицы.

Свойство непрерывности (волновое свойство) электромагнитного поля проявляется в том, что оно выступает в электромагнитных явлениях в форме электромагнитных волн.

Наличие у электромагнитного поля одновременно двух противоречивых свойств — прерывности и непрерывности — свидетельствует о том, что в действительности электромагнитное поле не является ни частицами, ни волнами в буквальном смысле этого слова. Электромагнитное поле — это вид материи, в котором диалектически сочетаются противоречивые свойства — прерывности и непрерывности; само поле во всех своих проявлениях выступает как единство этих противоположностей.

Установлено, что энергия фотона электромагнитного поля пропорциональна частоте электромагнитных колебаний, свойственных данному потоку фотонов:

$$W_{\phi} = h\nu, \quad (468)$$

где W_{ϕ} — энергия фотонов в эргах;
 ν — (читать «ни») — частота электромагнитных колебаний в герцах;
 $h = 6,624 \cdot 10^{-27}$ эрг · сек — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом Планка.

Пример 191. Частота электромагнитных колебаний рентгеновых лучей равна $\nu = 25 \cdot 10^{18}$ гц. Требуется определить энергию фотонов этих лучей.
Решение. Применяя формулу (468), находим

$$W_{\phi} = h\nu = 6,624 \cdot 10^{-27} \cdot 25 \cdot 10^{18} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ эрг.}$$

Чем больше энергии несет данный фотон, тем больше величина его электромагнитной массы:

$$m_{\phi} = \frac{W_{\phi}}{c^2}, \quad (469)$$

где W_{ϕ} — энергия фотона в эргах;
 c — скорость света;
 m_{ϕ} — масса фотона в граммах.

Пример 192. Требуется определить массу фотона рентгеновых лучей, если энергия его равна $W_{\phi} = 1,6 \cdot 10^{-7}$ эрг.
Решение. Применяя формулу (469), находим

$$m_{\phi} = \frac{W_{\phi}}{c^2} = \frac{1,6 \cdot 10^{-7}}{(3 \cdot 10^{10})^2} \approx 1,8 \cdot 10^{-28} \text{ г.}$$

Таким образом, масса фотона исчезающе мала. В соответствии с этим и масса электромагнитных полей также относительно мала по своей величине.

Зная мощность излучения электромагнитного поля осциллятором (излучателем) и частоту электромагнитных колебаний поля, можно определить общее количество фотонов, излучаемых осциллятором за единицу времени, и количество фотонов, проходящих за единицу времени через какую-либо поверхность.

Пример 193. Точечный осциллятор излучает электромагнитное поле, развивая мощность $P = 100$ вт при частоте колебаний $\nu = 10^6$ гц. Требуется определить, какое количество фотонов каждую секунду излучает осциллятор, какова их масса и какое количество фотонов проходит каждую секунду через 1 кв. см площадки, расположенной перпендикулярно к направлению распространения электромагнитного поля и удаленной от осциллятора на расстоянии $r = 5$ км.

Решение. Энергия каждого фотона данного электромагнитного поля равна

$$W_{\text{ф}} = h\nu = 6,624 \cdot 10^{-27} \cdot 10^6 \approx 6,6 \cdot 10^{-21} \text{ эрг.}$$

Электромагнитное поле каждую секунду уносит с собой энергию

$$W = Pt = 100 \cdot 1 = 100 \text{ дж} = 10^9 \text{ эрг.}$$

Масса электромагнитного поля, излучаемого в течение одной секунды, равна

$$m = \frac{W}{c^2} = \frac{10^9}{(3 \cdot 10^{10})^2} \approx 1,1 \cdot 10^{-12} \text{ г.}$$

Следовательно, если осциллятор будет работать непрерывно с неизменной мощностью в течение одного года, то электромагнитное поле, отпочковавшееся от него, унесет с собой массу, равную примерно нескольким сотым долям грамма.

Число N фотонов, излучаемых осциллятором за одну секунду, равно

$$N = \frac{W}{W_{\text{ф}}} = \frac{10^9}{6,6 \cdot 10^{-21}} \approx 1,5 \cdot 10^{29} \text{ фотонов.}$$

Поверхность шара радиусом $r = 5$ км $= 5 \cdot 10^5$ см, в центре которого расположен осциллятор, равна

$$S = 4\pi r^2 = 4 \cdot 3,14 (5 \cdot 10^5)^2 = 3,14 \cdot 10^{12} \text{ кв. см.}$$

Число фотонов, проходящих каждую секунду через 1 кв. см шаровой поверхности, равно

$$n = \frac{N}{S} = \frac{1,5 \cdot 10^{29}}{3,14 \cdot 10^{12}} \approx 4,8 \cdot 10^{16} \frac{\text{фотонов}}{\text{кв. см}},$$

т. е. за одну секунду через площадку в 1 кв. см, удаленную на 5 км от осциллятора, проходит 4,8 миллиарда миллиардов фотонов.

Из рассмотренного примера видно, что в каждом кубическом сантиметре электромагнитного поля содержится громадное количество фотонов, примерно равное числу молекул газа в 1 куб. см при атмосферном давлении. Естественно, что при

таких условиях весьма трудно заметить корпускулярность электромагнитного поля и оно воспринимается как нечто непрерывное, сплошное, распространяющееся в виде электромагнитных волн.

Волновые свойства электромагнитного поля обусловлены волновыми свойствами его фотонов. Поток фотонов, перемещающихся в пространстве со скоростью света, проявляется в форме волнообразного движения материи (электромагнитных волн).

Исследование электромагнитных полей показывает, что, будем ли мы рассматривать электромагнитное поле как поток движущихся дискретных частиц (фотонов) или как некоторое сплошное, непрерывное волнообразное движение его, всякий раз движение его подчиняется одним и тем же законам. Например, явления интерференции и дифракции наблюдаются как в том, так и в другом случае. Расчет энергии электромагнитного поля приводит к совершенно одинаковым результатам, будем ли мы исходить из энергии каждого фотона этого поля или объемной плотности энергии его как материального образования, распространяющегося в пространстве в форме электромагнитных волн.

Если энергия фотонов электромагнитного поля относительно велика, например энергия фотонов гамма-лучей или рентгеновых лучей, то длины электромагнитных волн этих лучей весьма малы (миллиардные доли сантиметра). В этом случае электромагнитное поле проявляет главным образом свои корпускулярные свойства. Фотоны его при встрече с элементарными вещественными частицами, например электронами, ядрами атомов, бомбардируют их и отдают им частично или полностью свою массу и энергию. Если, например, фотон гамма-лучей до встречи с электроном обладал энергией $W_{\phi} = h\nu$, то после столкновения с ним его энергия и масса уменьшатся. Согласно закону сохранения энергии и массы для данного случая

$$W_{\phi} = h\nu = h\nu' + \frac{mv^2}{2}, \quad (470)$$

где $h\nu$ — энергия фотона до столкновения с электроном;
 $h\nu'$ — энергия фотона после столкновения с электроном;
 $\frac{mv^2}{2}$ — кинетическая энергия электрона, полученная им в результате столкновения с фотоном.

Если масса фотона до столкновения с электроном была равна $m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2}$, то после столкновения с электроном она стала равной $m'_{\phi} = \frac{h\nu'}{c^2}$. Убыль массы фотона связана с переходом ее в электромагнитную массу электрона.

Частота колебаний рентгеновых лучей в результате столкновений фотонов с электронами снижается в соответствии с уменьшением их энергии, т. е. качество лучей становится несколько

иним. Скорость же движения фотонов после столкновения их с электронами остается по-прежнему равной скорости света.

Если фотоны электромагнитного поля обладают относительно малой энергией, например фотоны электромагнитных полей, излучаемых антеннами радиостанций, то длины волн этих полей относительно велики (единицы, сотни и даже тысячи метров). Электромагнитные поля в этом случае проявляют главным образом свои волновые свойства.

Зависимость длины волны электромагнитного поля от количества энергии каждого из его фотонов определяется формулой

$$\lambda = \frac{hc}{W_{\Phi}}, \quad (471)$$

где λ — длина электромагнитных волн в сантиметрах;

W_{Φ} — энергия фотонов в эргах;

$h = 6,624 \cdot 10^{-27}$ эрг · сек — постоянная Планка;

$c = 3 \cdot 10^{10}$ $\frac{см}{сек}$ — скорость света.

Пример 194. Определить длину волн электромагнитного поля, если каждый фотон его несет энергию, равную $W_{\Phi} = 6,6 \cdot 10^{-20}$ эрг.

Решение. Применяя формулу (471), находим

$$\lambda = \frac{hc}{W_{\Phi}} = \frac{6,624 \cdot 10^{-27} \cdot 3 \cdot 10^{10}}{6,6 \cdot 10^{-20}} \approx 3000 \text{ см} = 30 \text{ м}.$$

§ 159. СВОБОДНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Подобно веществу, которое может быть качественно различным, существуют качественно различные электромагнитные поля.

Электромагнитное поле называется **стационарным**, если оно сопровождается постоянным током в электрической цепи. Характерная особенность этого поля та, что оно неразрывно связано со своими вещественными источниками — движущимися зарядами.

Электромагнитное поле называется **квазистационарным** (т. е. как бы стационарным), если оно сопровождается токами низкой частоты. Оно, как и стационарное поле, неразрывно связано со своими вещественными источниками — движущимися электрическими зарядами.

Масса и энергия стационарного и квазистационарного электромагнитных полей возникают за счет массы и энергии вещественных источников этих полей. Если поле исчезает, то обычно оно отдает целиком всю массу и энергию вещественным частицам, являющимися носителями той или иной энергии, например тепловой и т. д.

В отличие от квазистационарного электромагнитного поля, создаваемого токами низкой частоты, свободное электромагнитное поле создается быстро колеблющимися

источниками поля, например токами высокой частоты в антенне радиопередающей станции. В этом случае электромагнитное поле благодаря высокой частоте своих колебаний и своей инертности, обусловленной его массой, не успевает целиком возвращать массу и соответственно энергию вещественным источникам и частично отпочковывается от них. Эта часть электромагнитного поля, отделившаяся от своих вещественных источников (быстро движущихся зарядов в антенне), становится независимой от них и распространяется самостоятельно в пространстве (рис. 366) в виде совокупности электромагнитных волн.

Электромагнитные волны, как и все иные физические волны, обусловлены некоторым колебательным процессом, в данном случае электромагнитными колебаниями.

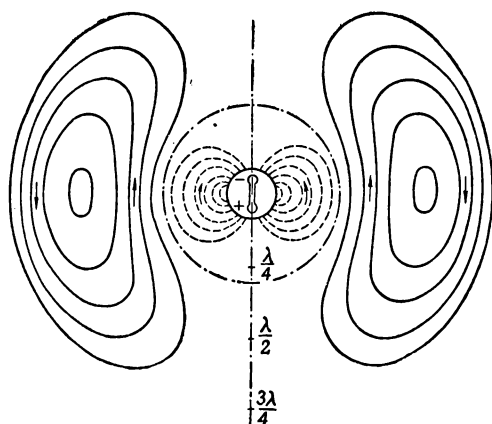


Рис. 366. Электромагнитное поле „отпочковывается“ от антенны и становится свободным

Электромагнитные колебания — это периодические изменения во времени и пространстве электрического и магнитного полей.

Установлено, что всякое свободное электромагнитное поле состоит из совокупности взаимообусловленных, неразрывно связанных друг с другом электрического и магнитного полей как некоторых материальных образований. Если электрическое поле как одна из составляющих электромагнитного поля исчезает, то оно создает магнитное поле, являющееся другой составляющей электромагнитного поля, и при этом передает ему свою массу и энергию. Наоборот, когда исчезает магнитное поле, оно создает электрическое поле, передавая ему свою массу и энергию. Этот процесс взаимного превращения электрического и магнитного полей друг в друга в свободной электромагнитной

волне протекает непрерывно с частотой, равной частоте электромагнитных колебаний.

Следовательно, если в данной области пространства имеется переменное электрическое поле, то оно создает в этой области и соседних с нею переменное магнитное поле, которое в свою очередь создает переменное электрическое поле, а это вызывает магнитное поле и т. д. Непрерывный процесс обмена массой и энергией электрического и магнитного полей с каждым новым колебанием захватывает все новые области пространства, благодаря чему электромагнитное поле распространяется в форме электромагнитных волн с некоторой конечной скоростью.

Движущей силой развития свободного электромагнитного поля является взаимодействие его двух противоречивых, взаимообусловленных и органически связанных сторон его — электрического и магнитного полей.

Электромагнитные волны характеризуются периодичностью во времени и пространстве.

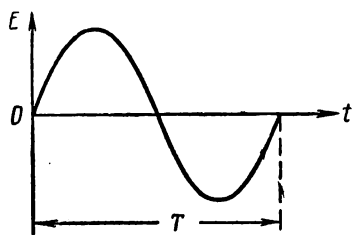


Рис. 367. Напряженность электрического поля изменяется во времени по синусоидальному закону

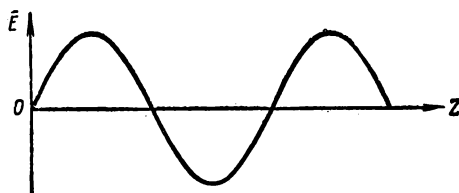


Рис. 368. Напряженность электрического поля изменяется в направлении оси OZ по синусоидальному закону

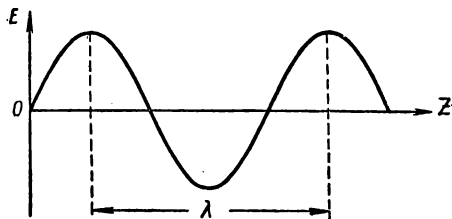
Периодичность во времени означает, что напряженности электрического и магнитного полей как составляющих электромагнитного поля изменяются во времени по периодическому закону, например по синусоидальному. На рис. 367 показана развернутая диаграмма напряженности электрического поля, изменяющейся во времени по закону синуса.

Периодичность в пространстве означает, что в направлении своего распространения электромагнитная волна изменяется в зависимости от расстояния по периодическому закону, например по синусоидальному. На рис. 368 показан график изменения напряженности электрического поля в направлении оси OZ по синусоидальному закону.

Число электромагнитных колебаний в одну секунду называется частотой электромагнитных колебаний.

Путь, проходимый электромагнитной волной за один период колебаний, называется длиной волны. На рис. 369 показана длина волны λ ; она равна расстоянию между двумя одинаковыми фазами колебания, например, между двумя соседними положительными амплитудами напряженности электрического поля.

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме равна $c = 3 \cdot 10^8 \frac{м}{сек}$, а во всех прочих средах она несколько ниже и находится в зависимости от диэлектрической и магнитной проницаемости среды.



Если известна скорость распространения электромагнитных волн и период электромагнитных колебаний, то длину электромагнитной волны можно определить по формуле

$$\lambda = vT, \quad (472)$$

Рис. 369. Длина электромагнитной волны

где λ — длина волны в метрах;
 v — скорость распространения электромагнитных волн в метрах в секунду;
 T — период в секундах.

Пример 195. Определить длину электромагнитных волн, распространяющихся в вакууме (практически в воздухе), если частота электромагнитных колебаний $\nu = 10^6$ гц.

Решение. Период электромагнитных колебаний

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{10^6} = 10^{-6} \text{ сек.}$$

Длина электромагнитной волны

$$\lambda = cT = 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{-6} = 300 \text{ м.}$$

В природе существует весьма большое разнообразие свободных электромагнитных полей, различающихся по частоте своих электромагнитных колебаний, или, иначе, по длине электромагнитных волн.

Качество электромагнитных полей зависит от их количественной характеристики — частоты электромагнитных колебаний. Надо заметить, что закон перехода количества в качество здесь находит свое яркое отображение.

В табл. 37 приведен спектр электромагнитных волн с указанием их основных качественных характеристик.

Спектр электромагнитных волн

Наименование волн	Частота колебаний, $гц$	Длина волны, $м$	Основные свойства
Длинные волны	$1,0—10^4$	$3 \cdot 10^9—3 \cdot 10^4$	Распространяются вдоль проводов электрических цепей
Радиоволны	$10^4—3 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^4—10^{-2}$	Излучаются антеннами радиопередающих устройств
Инфракрасные лучи	$3 \cdot 10^{10}—4 \cdot 10^{14}$	$10^{-2}—7,5 \cdot 10^{-7}$	Обладают тепловым действием
Световые лучи	$4 \cdot 10^{14}—7,5 \cdot 10^{14}$	$7,5 \cdot 10^{-7}—4 \cdot 10^{-7}$	Оказывают действие на зрительные органы
Ультрафиолетовые лучи	$7,5 \cdot 10^{14}—7,5 \cdot 10^{16}$	$4 \cdot 10^{-7}—4 \cdot 10^{-9}$	Обладают химическим действием
Рентгеновские лучи	$7,5 \cdot 10^{16}—2 \cdot 10^{19}$	$4 \cdot 10^{-9}—1,5 \cdot 10^{-11}$	Обладают способностью проникать через физические тела, не пропускающие световых лучей
Гамма-лучи	$2 \cdot 10^{19}—10^{21}$	$1,5 \cdot 10^{-11}—3 \cdot 10^{-13}$	Элементы этого поля могут „рождать“ пары — электрон и позитрон и возникать в результате взаимного погашения этих пар. Обладают большой способностью проникать в физические тела

§ 160. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Всякое свободное электромагнитное поле как некоторый вид материи обладает массой и энергией.

Электромагнитная энергия есть мера электромагнитной формы движения материи — распространения электромагнитного поля. Следовательно, зная закономерность изменения энергии и соответственно массы электромагнитного поля, можно судить о том, как протекает то или иное электромагнитное явление, как оно видоизменяется и переходит в иные формы движения материи.

Если известен закон изменения в пространстве и времени напряженностей электрического и магнитного полей как составляющих электромагнитного поля, то это значит, что известно само электромагнитное поле, направление передачи электромагнитной энергии в пространстве и т. д.

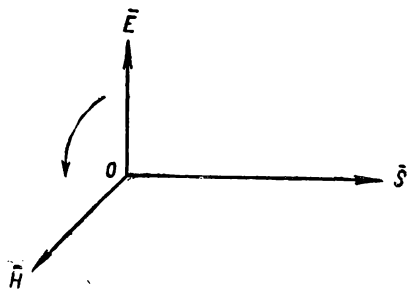


Рис. 370. Взаимное расположение векторов \vec{E} , \vec{H} и \vec{S} в некоторой точке O электромагнитного поля

Важной величиной, характеризующей интенсивность движения электромагнитной энергии в пространстве, является мощность потока этой энергии, отнесенная к единице поверхности, расположенной перпендикулярно направлению электромагнитной энергии.

Мощность потока электромагнитной энергии, отнесенная к единице поверхности, численно равна тому количеству энергии, которое переносится в единицу времени через единицу поверхности, расположенную перпендикулярно вектору скорости распространения энергии.

Мощность потока электромагнитной энергии, отнесенная к единице поверхности, — величина векторная, так как она характеризуется не только численным значением, но и направлением в пространстве.

Мысль о потоке переносимой в пространстве энергии и о мощности потока этой энергии, отнесенной к единице поверхности, впервые высказал в 1874 г. известный русский физик Н. А. Умов (1846—1915). Английский ученый Пойнтинг спустя одиннадцать лет применил теорему Умова о мощности потока движущейся в пространстве энергии к электромагнитным явлениям. Поэтому вектор, характеризующий мощность потока переносимой электромагнитной энергии, отнесенной к единице поверхности, называется вектором Умова—Пойнтинга (\vec{S}).

Если в данной точке электромагнитного поля известны направления векторов напряженности электрического и магнитного полей \vec{E} и \vec{H} , то направление вектора Умова—Пойнтинга в этой точке поля можно определить по правилу правого винта.

Если поворачивать вектор напряженности электрического поля \vec{E} до совпадения с вектором напряженности магнитного поля \vec{H} по кратчайшему пути согласно повороту винта правой системы, то поступательное движение винта покажет направление вектора Умова—Пойнтинга \vec{S} в данной точке, т. е. направление (луч), по которому через данную точку в данный момент времени передается электромагнитная энергия (рис. 370).

Численное значение вектора Умова—Пойнтинга можно определить по формуле

$$S = EH \cdot \sin(\widehat{E\vec{H}}), \quad (473)$$

где S — численное значение вектора Умова—Пойнтинга, выраженное в ваттах на квадратный метр;

E — напряженность электрического поля в вольтах на метр;

H — напряженность магнитного поля в амперах на метр;

$(\widehat{E\vec{H}})$ — угол, составленный векторами \vec{E} и \vec{H} в данной точке поля.

Пример 196. Электрическая лампа излучает в окружающее пространство электромагнитное поле, несущее с собой поток электромагнитной энергии (лучистой энергии). Требуется определить, какова мощность электромагнитного излучения этой лампы, если известно, что во всех точках, расположенных на расстоянии $r = 1$ м от лампочки, действующее значение напряженности электрического поля $E = 34,64 \frac{в}{м}$, а напряженность магнитного поля $H = 0,092 \frac{а}{м}$. Направления векторов \vec{E} и \vec{H} в этих точках взаимно перпендикулярны.

Решение. Численное значение вектора Умова—Пойнтинга в любой точке шаровой поверхности радиусом $r = 1$ м, равно

$$S = EH \cdot \sin(\widehat{E\vec{H}}) = 34,64 \cdot 0,092 = 3,19 \frac{вт}{м^2}.$$

Мощность потока электромагнитной энергии, приходящаяся на шаровую поверхность радиусом $r = 1$ м, равна

$$P = Ss = 3,19 \cdot 4\pi \cdot 1^2 = 3,19 \cdot 12,56 \approx 40 \text{ вт},$$

т. е. мощность электромагнитного излучения лампы равна 40 вт.

§ 161. ПЛОСКИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ В ОДНОРОДНОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ

Простейший вид электромагнитных волн — плоские волны в однородном диэлектрике.

Электромагнитная волна называется плоской, если в любой момент времени во всех точках любой плоскости, расположенной перпендикулярно к направлению распространения волны, векторы напряженности электрического E и магнитного H полей имеют одинаковые значения. Следовательно, эти векторы в плоской волне изменяются по величине только в направлении распространения волн и во времени.

Пример плоской волны — электромагнитная волна, излучаемая антенной передающей радиостанции; если эту волну рассматривать на относительно большом расстоянии от антенны — в несколько километров и более.

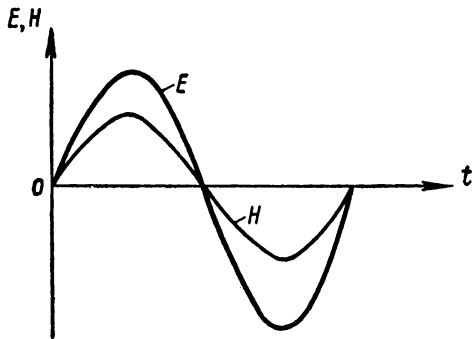


Рис. 371. Векторы \vec{E} и \vec{H} изменяются по закону синуса

Допустим, что плоская электромагнитная волна распространяется в однородном диэлектрике, например в воздухе, в направлении некоторой оси OZ и при этом электромагнитные колебания в ней совершаются по закону синуса. Это значит, что напряженности электрического E и магнитного H

полей изменяются по закону синуса и совпадают по фазе. Следовательно, если напряженность электрического поля E изменяется по закону

$$E = E_m \cdot \sin \omega t,$$

то в соответствии с этим напряженность магнитного поля будет изменяться по закону

$$H = H_m \cdot \sin \omega t,$$

т. е. напряженности электрического E и магнитного H полей в плоской волне в диэлектрике изменяются синфазно во времени.

На рис. 371 приведены развернутые диаграммы напряженностей электрического E и магнитного H полей для рассматриваемого случая.

Так как в рассматриваемом нами диэлектрике нет потерь электромагнитной энергии на необратимые процессы, то амплитуды напряженностей электрического E_m и магнитного H_m полей неизменны во времени и пространстве.

$$E_m = \text{const} \text{ и } H_m = \text{const}.$$

Отношение амплитуд электрического E_m и магнитного H_m полей в плоской волне — величина постоянная и определяется равенством

$$\frac{E_m}{H_m} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = \text{const}, \quad (474)$$

где $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ — диэлектрическая проницаемость вакуума (практически воздуха);

$\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7} \frac{2\pi}{\text{м}}$ — магнитная проницаемость вакуума (практически воздуха).

Следовательно, для воздуха

$$\frac{E_m}{H_m} = \sqrt{\epsilon \frac{4\pi}{10^7 \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}}} = 377 \text{ ом.} \quad (475)$$

Векторы напряженности электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей в любой точке поля плоской волны взаимно перпендикулярны и расположены в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения электромагнитных волн. При этом векторы \vec{E} , \vec{H} и направление распространения волны (ось OZ) образуют правовинтовую систему, т. е. если вектор \vec{E} вращать до совпадения с вектором \vec{H} по кратчайшему пути согласно повороту винта правовинтовой системы, то поступательное движение винта будет совпадать с направлением распространения электромагнитной волны.

Скорость распространения электромагнитной волны в вакууме (практически в воздухе) можно определить по формуле

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}, \quad (476)$$

или

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot \frac{4\pi}{10^7}}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

Длина плоской волны может быть определена по формуле

$$\lambda = vT, \quad (477)$$

где λ — длина волны в метрах;

$T = \frac{2\pi}{\omega}$ — период в электромагнитных колебаниях в секундах.

Поскольку электромагнитное поле не только изменяется во времени по синусоидальному закону, но и перемещается в пространстве вдоль оси OZ с постоянной скоростью $v = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$, напряженность электрического E и магнитного H полей изменяются в направлениях, параллельных оси OZ , по синусоидальному закону.

На рис. 372 показаны графики (синусоиды) зависимости величин E и H от расстояния z , расположенные во взаимно перпендикулярных плоскостях.

Так как напряженности электрического E и магнитного H полей изменяются по закону синуса в зависимости не только от

времени, но и расстояния по оси OZ , то мгновенное значение напряженности электрического поля выражается следующей формулой:

$$E = E_m \cdot \sin(\omega t - kz), \quad (478)$$

где z — расстояние от начала OZ до точки наблюдения;

$k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ — так называемое волновое число, или, иначе, фазовый коэффициент, выраженный в радианах на метр.

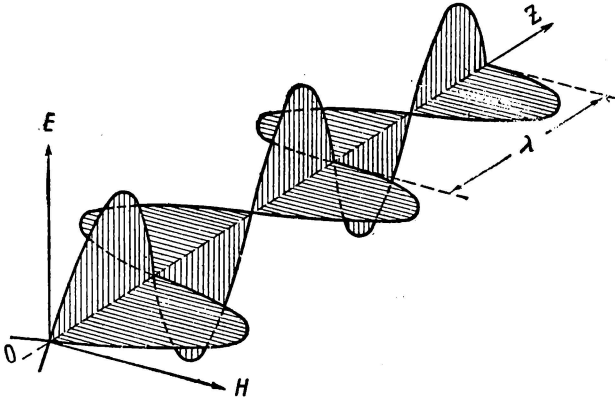


Рис. 372. Графики зависимости величин E и H от расстояния

Мгновенное значение напряженности магнитного поля

$$H = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_m \cdot \sin(\omega t - kz). \quad (479)$$

Мгновенное значение вектора Умова—Пойнтинга

$$S = E H = E_m \cdot \sin(\omega t - kz) \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_m \cdot \sin(\omega t - kz),$$

или

$$S = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E_m^2 \cdot \sin^2(\omega t - kz). \quad (480)$$

Среднее значение вектора Умова—Пойнтинга за период

$$S_{\text{ср}(T)} = \frac{E_m^2}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} = E_a^2 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}, \quad (481)$$

где E_a — действующее значение синусоидальной напряженности E электрического поля.

Плотности энергии электрического и магнитного полей соответственно равны

$$W_{э.о} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} \text{ и } W_{м.о} = \frac{\mu_0 H^2}{2}, \quad (482)$$

где $W_{э.о}$ — объемная плотность энергии электрического поля в джоулях на кубический метр;
 E — напряженность электрического поля в вольтах на метр;

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\phi}{м},$$

$W_{м.о}$ — объемная плотность энергии магнитного поля в джоулях на кубический метр;

H — напряженность магнитного поля в амперах на метр;

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7} \frac{гн}{м}.$$

Легко показать, что объемные плотности энергии электрического и магнитного полей в рассматриваемом случае равны:

$$\frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{\mu_0}{2} \left(\sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E \right)^2 = \frac{\mu_0 \epsilon_0}{2\mu_0} E^2 = \frac{\epsilon_0 E^2}{2},$$

т. е. $W_{э.о} = W_{м.о}$.

Пример 197. Плоская электромагнитная волна, падая на плоскость физического тела, расположенную перпендикулярно к направлению распространения луча, отдает каждую секунду 0,05 малых калорий тепла на каждый квадратный сантиметр этой плоскости. Определить напряженности электрического и магнитного полей этой плоской электромагнитной волны и плотность энергии этих полей.

Решение. Определим численное значение вектора Умова — Пойнтинга, т. е. количество джоулей, приходящихся на каждый квадратный метр поверхности за каждую секунду:

$$S = \frac{0,05 \cdot 10000}{0,24} = 2080 \frac{дж}{сек \cdot м^2} = 2080 \frac{вт}{м^2}.$$

Следовательно,

$$EH = 2080 \frac{вт}{м^2}.$$

Но так как

$$H = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E,$$

то

$$E^2 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} = 2080,$$

или

$$E^2 = \frac{2080}{\sqrt{\frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}}} = 78 \cdot 10^4 \text{ и } E = \sqrt{78 \cdot 10^4} = 886 \frac{\text{в}}{\text{м}}.$$

Напряженность магнитного поля

$$H = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} E = 886 \frac{1}{4\pi \cdot 30} = 2,35 \frac{\text{а}}{\text{м}}.$$

Объемная плотность энергии электрического поля

$$W_{\text{э.о}} = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \cdot \frac{886^2}{2} = 3,48 \cdot 10^{-6} \frac{\text{дж}}{\text{м}^3}.$$

Объемная плотность энергии магнитного поля

$$W_{\text{м.о}} = \frac{\mu_0 H^2}{2} = \frac{4\pi}{10^7} \cdot \frac{2,35^2}{2} = 3,48 \cdot 10^{-6} \frac{\text{дж}}{\text{м}^3}.$$

§ 162. ПЛОСКИЕ ВОЛНЫ В ПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ

Процесс распространения плоских электромагнитных волн в проводящей среде значительно отличается от аналогичного процесса в диэлектрике.

Допустим, что плоская электромагнитная волна, распространяющаяся в однородном диэлектрике, падает на плоскую поверхность металлической среды, расположенную перпендикулярно распространению данной волны. Рассмотрим, какие изменения претерпевает эта волна вследствие проникновения в данную металлическую среду.

Установлено, что скорость распространения электромагнитных волн в металлических средах (при всех прочих равных условиях) значительно меньше, чем в диэлектрике. При этом чем больше удельная проводимость γ и магнитная проницаемость μ металлической среды и чем больше период T электромагнитных колебаний, тем меньше скорость распространения электромагнитных волн в этой среде. Эта зависимость скорости распространения электромагнитных волн в проводящей среде от параметров ее γ и μ , а также от периода T электромагнитных колебаний выражается следующей формулой:

$$v = \sqrt{\frac{4\pi}{\mu\gamma T}}, \quad (483)$$

где μ — магнитная проницаемость среды в генри на метр;

γ — удельная проводимость в $\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}}$;

T — период в секундах;

v — скорость распространения электромагнитных волн в метрах в секунду.

Так как скорость распространения электромагнитных волн в металлической среде меньше, чем в диэлектрике, то и длина волны в ней будет меньше, чем в диэлектрике. Длину волны в проводящей среде определим по формуле

$$\lambda = vT,$$

или

$$\lambda = \sqrt{\frac{4\pi}{\mu\gamma T}} T = \sqrt{\frac{4\pi T}{\mu\gamma}}, \quad (484)$$

т. е. чем меньше период T электромагнитных колебаний и чем больше магнитная проницаемость μ и удельная проводимость γ металлической среды, тем (при прочих равных условиях) меньше длина волны (рис. 373).

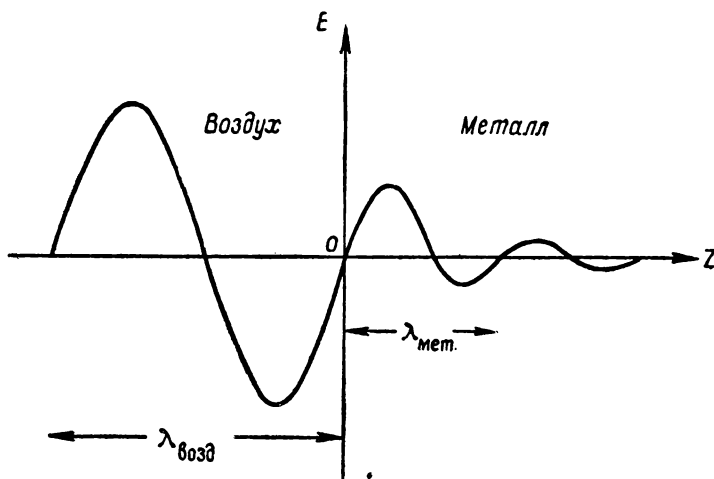


Рис. 373. Плоская волна при переходе из воздуха в металлическую среду изменяет свою длину и затухает

Пример 198. Плоская электромагнитная волна падает из воздуха на плоскую поверхность медной пластины, расположенной перпендикулярно к направлению распространения волны. Определить длину волны λ в меди и скорость v распространения ее там, если удельная проводимость меди $\gamma = 5 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}}$, магнитная проницаемость ее $\mu = \mu_r \mu_0 = 1 \cdot \frac{4\pi}{10^7} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{гн}}{\text{м}}$, а частота электромагнитных колебаний $\nu = 5 \cdot 10^6 \text{ гц}$.

Решение. Период электромагнитных колебаний

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{5 \cdot 10^6} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ сек.}$$

Скорость распространения электромагнитных волн

$$v = \sqrt{\frac{4\pi}{\mu\gamma T}} = \sqrt{\frac{4\pi}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^7 \cdot 2 \cdot 10^{-7}}} = 1000 \frac{\text{м}}{\text{сек}}.$$

Длина волны в меди

$$\lambda = vT = 1000 \cdot 2 \cdot 10^{-7} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 0,2 \text{ мм},$$

в то время как в воздухе скорость распространения электромагнитных волн

$$v_{\text{возд}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{сек}},$$

а длина волны (при заданной частоте)

$$\lambda_{\text{возд}} = v_{\text{возд}} T = 3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-7} = 60 \text{ м}.$$

В металлической среде в отличие от диэлектрика электромагнитные волны весьма быстро затухают. Это объясняется тем, что электромагнитное поле, войдя во взаимодействие с металлом, быстро расходует свою массу и энергию, преобразуя ее в массу и энергию вещественных частиц металла. В соответствии с этим глубина проникновения электромагнитных полей в металлическую среду обычно измеряется долями миллиметра.

Установлено, что убывание амплитуд напряженностей электрического E_m и магнитного H_m полей в зависимости от расстояния z , пройденного электромагнитным полем в металлической среде, происходит по экспоненциальному закону

$$E_m = E_{m0} e^{-\beta z}, \quad (485)$$

где E_{m0} — амплитуда напряженности электрического поля на плоскости раздела диэлектрика (воздуха и металла), т. е. при $z = 0$;

z — расстояние, пройденное электромагнитным полем в металлической среде от некоторой начальной точки $z = 0$, расположенной на плоскости раздела диэлектрика и металлической среды;

$e=2,718$ — основание натуральных логарифмов;

β — коэффициент затухания электромагнитной волны, определяемой по формуле

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu \gamma \omega}{2}}. \quad (486)$$

Из формулы (486) следует, что чем больше магнитная проницаемость μ , удельная проводимость γ и угловая частота ω электромагнитных колебаний, тем больше коэффициент затухания β и тем, следовательно, быстрее затухает электромагнитное поле в проводящей среде.

Пример 199а. Определить минимальную толщину стенки электромагнитного экрана, сделанного из алюминия ($\gamma = 3,6 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{ОМ} \cdot \text{М}}$), если при прохождении через него электромагнитных волн электромагнитное поле должно быть ослаблено в 200 раз. Угловая частота электромагнитных колебаний равна $\omega = 1,1 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{сек}}$.

Решение. Если электромагнитное поле по выходе из экрана должно ослабнуть в 200 раз, то это значит, что амплитуда напряженности электрического и магнитного полей должны порознь также уменьшиться в 200 раз, т. е.

$$e^{-\beta z} = \frac{1}{200} = 0,005.$$

Коэффициент затухания в рассматриваемом случае равен

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu\gamma\omega}{2}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3,6 \cdot 10^7 \cdot 1,1 \cdot 10^6}{2}} = 5 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{м}}.$$

Следовательно,

$$e^{-5000z} = 0,005,$$

или, иначе,

$$e^{5000z} = 200.$$

Логарифмируя последнее равенство, получаем

$$5000z \lg 2,718 = \lg 200,$$

или

$$5000z \cdot 0,436 = 2,302,$$

откуда

$$z = \frac{2,302}{2230} \approx 0,00106 \text{ м} \approx 1,1 \text{ мм.}$$

т. е. для того чтобы ослабить заданное электрическое поле в 200 раз, необходимо на его пути поставить алюминиевый экран толщиной в 1,1 мм.

Для того чтобы можно было судить о том, как быстро затухает электромагнитная волна в проводящей среде, введена величина, называемая **глубиной погружения** d электромагнитной волны. Под последней подразумевают то расстояние, на протяжении которого амплитуды напряженностей электрического E_m и магнитного H_m полей уменьшаются в $e = 2,718$ раз по сравнению с амплитудами E_{m0} и H_{m0} на границе перехода из воздуха (диэлектрика) в данную металлическую среду.

В табл. 38 приведены для сравнения величины глубин погружения и скорость распространения электромагнитных волн в меди при различных частотах электромагнитных колебаний.

Т а б л и ц а 38

Частота колебаний, гц	Длина волны в воздухе, м	Скорость распространения электромагнитной волны в меди, м/сек	Глубина погружения электромагнитной волны в медь, м
10^{10}	0,03	42 000	$0,67 \cdot 10^{-6}$
10^8	3,0	4 200	$6,7 \cdot 10^{-6}$
10^6	300	420	$67 \cdot 10^{-6}$
50	$6 \cdot 10^{-6}$	3	$9,5 \cdot 10^{-3}$

В табл. 39 приведены для сравнения глубины погружения электромагнитных волн в различные металлы.

Т а б л и ц а 39

Длина волны в воздухе, мм	Глубина погружения электромагнитной волны в металлах, м		
	медь	алюминий	никель
0,03	$0,67 \cdot 10^{-6}$	$0,86 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$
3,0	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$	$29 \cdot 10^{-6}$
300	$67 \cdot 10^{-6}$	$86 \cdot 10^{-6}$	$290 \cdot 10^{-6}$
$6 \cdot 10^6$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$12,1 \cdot 10^{-3}$	$42 \cdot 10^{-3}$

Из вышеприведенных таблиц видно, что глубина погружения электромагнитных волн в металлы очень мала. Для коротких радиоволн она измеряется десятитысячными долями миллиметра, для длинных волн — несколькими долями сантиметра в зависимости от длины волны и удельной проводимости металла.

В заключение отметим, что и в полупроводящих средах также происходит относительно быстрое затухание электромагнитных волн. Например, электромагнитные волны длиной $\lambda = 300$ м при проникновении из воздуха в морскую воду уменьшают амплитуду своих колебаний примерно в миллион раз на расстоянии нескольких метров от поверхности воды.

§ 163. СТАЦИОНАРНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Стационарным электромагнитным полем называется поле в цепях постоянного тока.

Отличительная особенность такого поля та, что оно неразрывно связано с электрической цепью и распространяется от генератора к потребителю вдоль соединительных проводов по окружающему эти провода диэлектрику, например по воздуху.

Электромагнитная энергия, которую несет стационарное электромагнитное поле от генератора к потребителю, расходуется частично в соединительных проводах, а остальная, более значительная часть ее отдается электромагнитным полем потребителю.

Электромагнитное поле, проникнув извне в провода электрической цепи, создает в них электрический ток. А так как это поле стационарное, то и ток в цепи стационарный, т. е. постоянный.

Следовательно, постоянный ток и стационарное электромагнитное поле неразрывно связаны друг с другом в электрической цепи. При этом стационарное электромагнитное поле преобразует свою энергию в проводниках цепи с помощью электрического тока в тепловую энергию.

Рассмотрим стационарное электромагнитное поле в системе линии электропередачи, по которой протекает некоторый постоянный ток I .

На рис. 374 показана такая линия в разрезе чертежа. В левом проводе (прямом) ток уходит от нас за плоскость чертежа, т. е. от генератора к потребителю, что и обозначено на сечении провода крестиком. В правом проводе (обратном) ток идет к нам из-за плоскости чертежа, т. е. от потребителя к генератору, что обозначено точкой. Магнитные силовые линии показаны

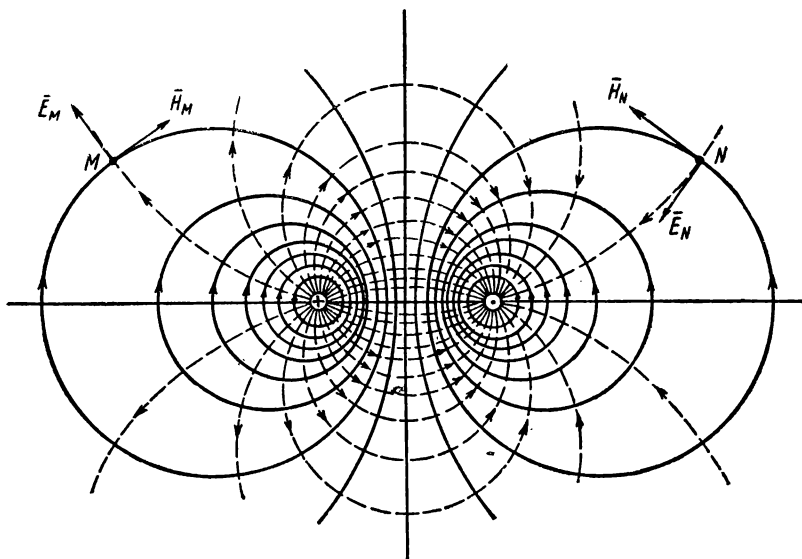


Рис. 374. Магнитные и электрические поля системы проводов линии передачи энергии

сплошными линиями. Их направление легко определить по правилу буравчика. Электрические силовые линии — пунктирные. Они начинаются на положительно заряженном проводе (обратном) и оканчиваются на отрицательно заряженном (прямом).

Если определить направление вектора Умова — Пойнтинга для точки M , расположенной вблизи прямого провода, и для точки N , расположенной вблизи обратного провода, то нетрудно убедиться в том, что в каждой из них он направлен за плоскость чертежа, т. е. от генератора к потребителю. А это значит, что электромагнитное поле распространяется вдоль прямого и обратного проводов линии электропередачи как некоторых направляющих от генератора к потребителю.

Если бы провода линии были идеальными, т. е. сопротивление их было бы равно нулю, то в них не было бы потерь энергии.

Электромагнитное поле не проникало бы в провода, и внутри них не было бы составляющей вектора напряженности электрического поля, направленной вдоль осей этих проводов. Вектор напряженности электрического поля

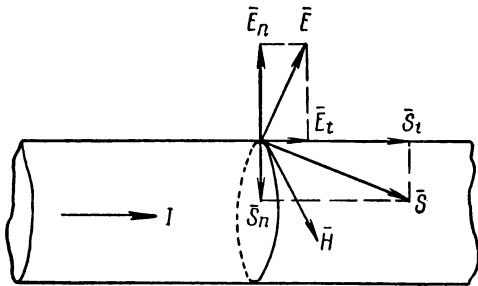


Рис. 375. Вектор \vec{E} имеет две составляющие, \vec{E}_t и \vec{E}_n

в этом идеальном случае был бы направлен нормально (перпендикулярно) к поверхности проводов.

Однако каждый провод обладает тем или иным сопротивлением, в котором электромагнитное поле неизбежно теряет свою энергию вследствие преобразования ее в тепловую энергию.

В этом случае вектор напряженности электрического поля уже не будет перпендикулярным поверхности провода и его можно в любой точке поверхности проводов разложить на две составляющие (рис. 375):

$$\vec{E} = \vec{E}_n + \vec{E}_t, \quad (487)$$

где \vec{E}_n — нормальная, т. е. перпендикулярная поверхности провода, составляющая;

\vec{E}_t — тангенциальная составляющая, направленная по поверхности провода параллельно его оси.

В соответствии с двумя составляющими вектора напряженности электрического поля мы имеем две составляющие вектора Умова — Пойнтинга. Одна из них, тангенциальная составляющая \vec{S}_t , обусловлена векторами \vec{E}_n и \vec{H} и равна

$$S_t = E_n H \cdot \sin(\widehat{\vec{E}_n \vec{H}}). \quad (488)$$

Тангенциальная составляющая \vec{S}_t вектора Умова — Пойнтинга дает возможность определить количество электромагнитной энергии, переносимой вдоль проводов от генератора к потребителю.

Другая составляющая вектора Умова — Пойнтинга — нормальная составляющая \vec{S}_n — обусловлена векторами \vec{E}_t и \vec{H} и равна

$$S_n = E_t H \cdot \sin(\widehat{\vec{E}_t \vec{H}}). \quad (489)$$

Нормальная составляющая \vec{S}_n вектора Умова — Пойнтинга позволяет определить количество электромагнитной энергии, вносимой в провод через его поверхность из внешней среды.

Подсчитаем, какое количество электромагнитной энергии проникает извне в провод на его участке длиной l метров. Для этого определим величины E_t и H на поверхности провода.

Напряженность магнитного поля на поверхности цилиндрического провода, как известно, равна

$$H = \frac{I}{2\pi R},$$

где H — напряженность магнитного поля в амперах на метр;

I — величина тока в проводе в амперах;

R — радиус провода в метрах.

Тангенциальная составляющая E_t вектора напряженности электрического поля в точках на поверхности провода численно равна падению напряжения на единицу длины провода, т. е.

$$E_t = \frac{U}{l}, \quad (490)$$

где E_t — тангенциальная составляющая вектора напряженности электрического поля в вольтах на метр;

U — напряжение на участке провода длиной в l метров в вольтах;

l — длина провода в метрах.

Векторы \vec{E}_t и \vec{H} на поверхности провода взаимно перпендикулярны, а поэтому

$$\sin(\widehat{\vec{E}_t, \vec{H}}) = 1.$$

Следовательно, нормальная составляющая вектора Умова—Пойнтинга S_n равна

$$S_n = E_t H = \frac{U}{l} \frac{I}{2\pi R} \left(\frac{\text{вт}}{\text{м}^2} \right).$$

Чтобы определить, какую мощность поглощает провод на участке длиной l метров, надо величину S_n помножить на боковую поверхность цилиндра (провода) $s = 2\pi Rl$, и тогда получим

$$P = S_n s = \frac{U}{l} \frac{I}{2\pi R} 2\pi Rl,$$

или

$$P = UI, \quad (491)$$

где P — мощность, поглощаемая проводом на участке длиной l метров, в ваттах;

U — напряжение в вольтах;

I — ток в амперах.

Полученная нами формула в точности совпадает с известной формулой, определяющей мощность потерь в проводе на тепловую энергию:

$$P = UI = I^2 r,$$

где r — сопротивление провода длиной l метров в омах.

Если электромагнитная энергия переносится от источника ее к потребителю вдоль проводов по окружающему пространству (по диэлектрику), то это значит, что поток электрической энергии вытекает из источника в окружающее пространство.

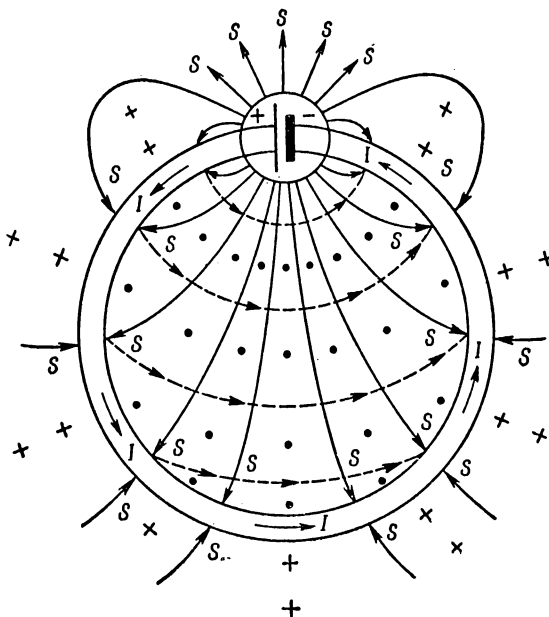


Рис. 376. Электромагнитная энергия переносится в направлении линий вектора Умова — Пойнтинга

На рис. 376 схематически показана картина линий S вектора Умова—Пойнтинга, т. е. условных линий, в направлении которых переносится электромагнитная энергия от химического источника электрической энергии к внешней цепи, состоящей из совокупности проводников. Направление электрических линий электромагнитного поля здесь показано стрелками на пунктирных линиях, а направление магнитных линий электромагнитного поля внутри контура — точками, а вне контура — крестиками.

В заключение следует отметить, что примитивное представление о том, что электромагнитная энергия переносится электрона-

ми внутри объемов проводов от генератора к потребителю наподобие того, как вода несет гидравлическую энергию по трубопроводу, ошибочно. **Носителем электромагнитной энергии**, передатчиком ее от генератора к любому потребителю является **электромагнитное поле** с присущей ему как некоторому материальному объекту массой и энергией. При этом распространение электромагнитного поля, как правило, происходит по диэлектрику, и всякое проникновение его в проводящие тела, например провода линии передачи или проводники потребителя, связано с потерей электромагнитным полем его массы и энергии путем преобразования в массу и энергию каких-либо иных материальных частиц.

§ 164. ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ

Если в проводе протекает постоянный электрический ток I , то он распределяется по любому поперечному сечению S этого провода с одинаковой плотностью

$$j = \frac{I}{S} = \text{const.}$$

Это значит, что при постоянном электрическом токе стационарное электромагнитное поле проникает извне во всю толщю провода и его напряженность во всех точках поперечного сечения одинакова по величине и направлению. Это справедливо и для квазистационарных электромагнитных полей, возникающих при токах низкой частоты. Например, для переменного тока, имеющего частоту $f = 50$ гц, с большой степенью точности можно считать, что ток распределяется с одинаковой плотностью по всему поперечному сечению провода. Сопротивление провода в этом случае можно рассчитывать по обычной формуле, применяемой для расчета сопротивлений проводов при постоянном токе:

$$R = \frac{\rho l}{S}.$$

Однако при переходе от токов низкой частоты к токам высокой частоты, порядка многих тысяч или даже миллионов периодов в секунду, равномерность распределения плотности тока по сечению провода нарушается, и чем больше частота, тем больше неравномерность распределения плотности тока. Ток в этом случае как бы отесняется от оси провода к его периферии (поверхности), так что плотность тока в точках, близлежащих к оси провода, становится практически равной нулю, в то время как у поверхности провода она становится максимальной.

Явление отеснения токов высокой частоты от оси провода к его периферии называется **поверхностным эффектом**.

Поверхностный эффект объясняется тем, что при токах высокой частоты электромагнитное поле не успевает глубоко проникнуть в толщу провода вследствие своей инерции, относительно малой скорости распространения в металлах и затухания. Его действие в данном случае проявляется только в тончайшем слое у поверхности провода. Поэтому активное сопротивление провода увеличивается, так как не через все сечение провода проходит ток.

Опытом установлено, что чем больше частота переменного тока, магнитная проницаемость, удельная проводимость и радиус провода, тем больше проявляет себя поверхностный эффект и тем большим становится активное сопротивление провода.

Отношение активного сопротивления провода при токах высокой частоты колебаний (при поверхностном эффекте) к сопротивлению его при постоянном токе определяется по формуле

$$\frac{r}{r_0} = \frac{a \sqrt{\omega \mu \gamma}}{2 \sqrt{2}}, \quad (492)$$

где r — активное сопротивление провода при поверхностном эффекте в омах;

r_0 — сопротивление провода при постоянном токе (практически и при токах низкой частоты) в омах;

a — радиус провода в метрах;

ω — угловая частота синусоидальных колебаний в $\frac{1}{\text{сек}}$;

γ — удельная проводимость материала провода в $\frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}}$;

μ — магнитная проницаемость провода в $\frac{2\pi}{\text{м}}$.

Пример 1996. Требуется определить, во сколько раз увеличится активное сопротивление медного цилиндрического провода вследствие поверхностного эффекта, если радиус провода $a = 0,5$ см, удельная проводимость его $\gamma = 6 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}}$ и магнитная проницаемость $\mu = \mu_r \mu_0 = 1 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{2\pi}{\text{м}}$. Частота тока в проводе равна $f = 2 \cdot 10^6$ гц.

Решение. Угловая частота тока

$$\omega = 2\pi f = 4\pi \cdot 10^6 \frac{1}{\text{сек}}.$$

Отношение активного сопротивления провода при частоте $f = 2 \cdot 10^6$ гц к сопротивлению при постоянном токе определим по формуле (492)

$$\frac{r}{r_0} = \frac{a \sqrt{\omega \mu \gamma}}{2 \sqrt{2}} = \frac{0,005 \sqrt{4\pi \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 10^7}}{2 \sqrt{2}} = 54,$$

т. е. активное сопротивление провода при частоте $f = 2 \cdot 10^6$ гц увеличилось в 54 раза по сравнению с его сопротивлением при постоянном токе.

В радиотехнике, где приходится иметь дело с токами высокой частоты, часто вместо сплошных проводников применяются трубчатые, покрытые по поверхности серебром.

Так как при относительно высоких частотах, применяемых в технике проводной связи, центральная часть провода не используется из-за явления поверхностного эффекта, то ее часто заменяют более дешевым и в то же время механически более крепким материалом.

Так называемые биметаллические провода имеют внутренний объем из стали, а внешнюю оболочку из меди.

Явление поверхностного эффекта широко применяется в электротехнике для поверхностной закалки металлов. Крупнейшим специалистом в этой области был член-корреспондент Академии наук СССР **В. П. Вологдин** (1881—1953).

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

ГЛАВА XXX

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

§ 165. ЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для контроля за правильностью работы электротехнических установок, испытания их, определения параметров электрических цепей, учета расходуемой электрической энергии и т. д. производят различные электрические измерения.

В технике связи, как и в технике сильных токов, электрические измерения имеют важное значение. Всякую телефонную телеграфную линию нужно периодически проверять с точки зрения соответствия предъявляемым к ней требованиям. Например, для надежной работы линии связи требуется периодически измерять сопротивления проводов и изоляции. В случае порчи изоляции и вследствие этого большой утечки тока в землю необходимо путем соответствующих измерений быстро отыскать место повреждения линии.

Для нормальной работы аппаратуры связи, например телеграфных аппаратов, радиостанций и т. д., надо тщательно наблюдать за их режимом работы, пользуясь для этого электроизмерительными приборами — амперметрами, вольтметрами и т. д. При эксплуатации источников электрической энергии — генераторов, аккумуляторных батарей, гальванических элементов — необходимо также тщательно следить за правильностью их работы, за соответствием их данным установкам и т. д., что достигается неослабным контролем над ними при помощи электроизмерительных приборов.

Приборы, с помощью которых измеряются различные электрические величины: ток, напряжение, сопротивление, мощность и т. д., — называются электрическими измерительными приборами.

§ 166. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПО ПРИНЦИПУ ИХ ДЕЙСТВИЯ

По принципу действия электроизмерительные приборы подразделяются на следующие основные типы:

1. Приборы магнитоэлектрической системы, основанные на принципе взаимодействия катушки с током и внешнего магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом.

2. Приборы электродинамической системы, основанные на принципе электродинамического взаимодействия двух катушек с токами, из которых одна неподвижна, а другая подвижна.

3. Приборы электромагнитной системы, в которых используется принцип взаимодействия магнитного поля неподвижной катушки с током и подвижной железной пластинки, намагниченной этим полем.

4. Тепловые измерительные приборы, использующие тепловое действие электрического тока. Нагретая током проволока удлиняется, провисает, и вследствие этого подвижная часть прибора получает возможность повернуться под действием пружины, выбирающей образовавшуюся слабину проволоки.

5. Приборы индукционной системы, основанные на принципе взаимодействия вращающегося магнитного поля с токами, индуктированными этим полем в подвижном металлическом цилиндре.

6. Приборы электростатической системы, основанные на принципе взаимодействия подвижных и неподвижных металлических пластин, заряженных разноименными электрическими зарядами.

7. Приборы термоэлектрической системы, представляющие собой совокупность термопары с каким-либо чувствительным прибором, например магнитоэлектрической системы. Измеряемый ток, проходя через термопару, способствует возникновению термотока, воздействующего на магнитоэлектрический прибор.

8. Приборы вибрационной системы, основанные на принципе механического резонанса вибрирующих тел. При заданной частоте тока наиболее интенсивно вибрирует тот из якорьков электромагнита, период собственных колебаний которого совпадает с периодом навязанных колебаний.

В табл. 40 приведены условные обозначения электроизмерительных приборов по принципу их действия, а в табл. 41 — некоторые условные обозначения, наносимые на шкалы приборов.

Таблица 40

**Условные обозначения электроизмерительных приборов
по принципу их действия**
















Система прибора	Условный знак	Система прибора	Условный знак
Магнитоэлектрическая		Индукционная	
Электродинамическая		Электростатическая	
Электромагнитная		Термоэлектрическая	
Тепловая		Вибрационная	

Таблица 41

**Условные обозначения, наносимые на шкалы электроизмерительных
приборов**

Пояснение к условному обозначению	Условный знак	Пояснение к условному обозначению	Условный знак
Постоянный ток		Частота 50 гц	
Переменный ток		Изоляция прибора испытана на 2000 в	
Постоянный и переменный ток		Вертикальная установка прибора	
Двухфазный ток		Горизонтальная установка прибора	
Трехфазный ток		Наклонная установка прибора под углом 60°	

§ 167. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПО РОДУ ИЗМЕРЯЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ

Электроизмерительные приборы классифицируются и по роду измеряемой ими величины, так как приборы одного и того же принципа действия, но предназначенные для измерения разных величин могут значительно отличаться друг от друга по своей конструкции, не говоря уже о шкале прибора.

В табл. 42 приведен перечень условных обозначений наиболее употребительных электроизмерительных приборов.

Таблица 42

**Условные обозначения электроизмерительных приборов
по роду измеряемых ими величин**

Наименование электроизмерительного прибора	Условный знак прибора	Измеряемая величина	Наименование единиц измерения
Амперметр	<i>A</i>	Ток	Ампер
Миллиамперметр	<i>mA</i>	Ток	Миллиампер
Гальванометр	<i>G</i>	Ток	Микроампер
Вольтметр	<i>V</i>	Напряжение и э. д. с.	Вольт
Омметр	Ω	Сопротивление	Ом
Меггер	<i>MΩ</i>	Сопротивление	Мегом
Ваттметр	<i>W</i>	Электрическая мощность	Ватт, киловатт
Счетчик электрической энергии	<i>Kwh</i>	Электрическая энергия	Киловатт-час
Частотомер	<i>f</i>	Частота тока	Герц

§ 168. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ПО СТЕПЕНИ ИХ ТОЧНОСТИ

Абсолютной погрешностью прибора называют разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины. Например, абсолютная погрешность амперметра равна

$$\delta = I - I_0, \quad (493)$$

где δ — (читать «дельта») — абсолютная погрешность в амперах;

I — показание прибора в амперах;

I_0 — истинное значение измеряемого тока в амперах.

Если $I > I_0$, то абсолютная погрешность прибора положительна, а при $I \leq I_0$, она отрицательна.

Поправкой прибора называют величину, которую надо прибавить к показаниям прибора, чтобы получить истинное значение измеряемой величины. Из формулы (493) следует, что

$$I_0 = I - \delta = I + (-\delta).$$

Следовательно, поправка прибора — это величина, численно равная абсолютной погрешности прибора, но противоположная ей по знаку. Например, если амперметр показал $I = 5$ а, а абсолютная погрешность прибора равна $\delta = 0,1$ а, то истинное значение измеряемой величины равно $I = 5 + (-0,1) = 4,9$ а.

Приведенной погрешностью прибора называется отношение абсолютной погрешности к наибольшему возможному отклонению показателя прибора (номинальному показанию прибора). Например, для амперметра

$$\beta = \frac{\delta}{I_N} \cdot 100\% = \frac{I - I_2}{I_N} \cdot 100\%, \quad (494)$$

где β — приведенная погрешность в процентах;

I_N — номинальное показание прибора.

Точность прибора характеризуется величиной его максимальной приведенной погрешности.

Согласно ГОСТ 1845—52 приборы по степени их точности разделяются на 7 классов: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0.

Если, например, данный прибор имеет класс точности 1,5, то это значит, что его максимальная приведенная погрешность равна 1,5%.

Электроизмерительные приборы, имеющие классы точности 0,1 и 0,2, как наиболее точные, применяются там, где требуется весьма большая точность измерения.

Если прибор имеет приведенную погрешность выше 4%, то он считается внеклассным.

§ 169. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ПОСТОЯННАЯ ПРИБОРА

Чувствительностью прибора называют отношение углового или линейного перемещения указателя прибора, приходящееся на единицу измеряемой величины.

Если шкала прибора равномерна, то чувствительность его по всей шкале одинакова. Например, чувствительность амперметра, имеющего равномерную шкалу, определяется формулой

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta I}, \quad (495)$$

где S — чувствительность амперметра в делениях на ампер;

ΔI — приращение тока в амперах или миллиамперах;

$\Delta\alpha$ — приращение углового перемещения показателя прибора в градусах или миллиметрах.

Если шкала прибора неравномерна, то чувствительность прибора в различных областях шкалы различна, так как одному и тому же приращению (например, тока) будут соответствовать разные приращения углового или линейного перемещения показателя прибора.

Величина, обратная чувствительности прибора, называется постоянной прибора. Следовательно, постоянная прибора — это цена деления прибора, или, иначе, величина, на которую должен быть помножен отсчет по шкале в делениях, чтобы получить измеряемую величину. Например, если постоянная прибора равна $10 \frac{ма}{дел}$ (десять миллиампер на деление), то при отклонении его указателя на $\alpha = 10$ делений измеряемая величина тока равна $I = 10 \cdot 10 = 100 \text{ ма}$.

§ 170. МОЩНОСТЬ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ПРИБОРАХ

Электроизмерительные приборы потребляют при работе энергию, которая в них преобразуется обычно в тепловую энергию. Мощность потерь зависит от режима в цепи, а также от системы и конструкции прибора. Если измеряемая мощность относительно мала, а следовательно, относительно малы ток или напряжение в цепи, то мощность потерь энергии в самих приборах может заметно влиять на режим исследуемой цепи и показания приборов могут иметь довольно большую погрешность. При точных измерениях в цепях, где развиваемые мощности сравнительно малы, необходимо знать мощность потерь энергии в приборах. В табл. 43 приведены средние величины мощности потерь энергии в различных системах электроизмерительных приборов.

Таблица 43

Таблица мощности потерь энергии в электроизмерительных приборах

Система прибора	Вольтметры на 100 в, вт	Амперметры на 5 а, вт
Магнитоэлектрическая	0,1— 1,0	0,2— 0,4
Электромагнитная	2,0— 5,0	2,0— 8,0
Индукционная	2,0— 5,0	1,0— 4,0
Электродинамическая	3,0— 6,0	3,5—10,0
Тепловая	8,0—20,0	2,0— 3,0

§ 171. ПРИБОРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Электроизмерительные приборы магнитоэлектрической системы основаны на принципе взаимодействия подвижной катушки 1 с током и магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом 2 (рис. 377).

Известно, что плоская катушка 1 с током, помещенная в магнитное поле постоянного магнита 2 , стремится установиться так, чтобы ее про-

низывал максимальный магнитный поток и чтобы направление ее собственного магнитного поля совпало с направлением магнитного поля постоянного магнита внутри нее.

Если площадь плоской катушки равна S , число витков ее — w , магнитная индукция, создаваемая постоянным магнитом, — B , то при токе в катушке, равном I , она испытывает вращающий момент

$$M = wBS \cdot \sin \alpha, \quad (496)$$

где M — вращающий момент в ньютонметрах;

B — магнитная индукция в $\frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$;

w — число витков катушки;

S — площадь рамки в квадратных метрах;

α — угол, составленный перпендикуляром к плоскости рамки с направлением магнитных линий;

I — ток в амперах.

Обычно конструкция магнитоэлектрического прибора такова, что величины, входящие в формулу (496), постоянны, за исключением тока I , который зависит от нагрузки в цепи.

Полагая, что

$$wBS \cdot \sin \alpha = k = \text{const},$$

получим

$$M = kI, \quad (497)$$

т. е. вращающий момент, приложенный к катушке, пропорционален величине тока I . Под влиянием этого вращающего момента катушка поворачивается в магнитном поле. Этому повороту противодействуют спиральные пружины 3, сжимающиеся или разжимающиеся при повороте рамки. При установлении равновесия сил, стремящихся повернуть рамку, и сил сопротивления упругих спиральных пружин рамка займет определенное положение в магнитном поле, повернувшись на некоторый угол. Угол поворота рамки пропорционален току I , протекающему по ее виткам, а поэтому прибор можно отгра-

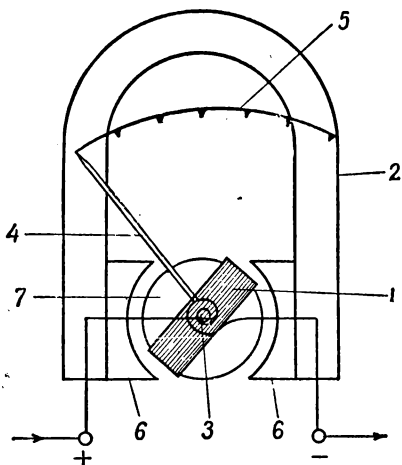


Рис. 377. Схематическое изображение магнитоэлектрического прибора

дуировать так, что его показания будут соответствовать величине измеряемого тока.

Вместе с катушкой поворачивается стрелка (указатель) прибора 4, конец которой перемещается по шкале 5 прибора с нанесенными на нее делениями измеряемой величины. Так как вращающий момент пропорционален току I в первой степени, то можно иметь на приборе шкалу равномерную, т. е. такую, для которой каждое деление соответствует одинаковому углу поворота подвижной части прибора.

Если изменить направление тока в катушке прибора, то изменится направление действия сил на катушку и стрелка прибора будет отклоняться в обратном направлении. Следовательно, прибор требует соблюдения полярности или же наличия двусторонней шкалы.

Постоянный магнит 2 прибора изготовляют из высокосортной кобальтовой, хромистой стали или никелево-алюминиевого сплава, обладающих большой задерживающей силой. Магнитная индукция, создаваемая ими в воздушном зазоре магнитной цепи прибора, достигает десятых долей вольт-секунды на квадратный метр.

Полюсные надставки 6 делают из мягкой литой стали, и им придают такую форму, чтобы линии магнитного поля были радиальны к поверхности цилиндра 7, помещенного между ними. Цилиндр, выполняющий роль железного сердечника катушки, изготовляют из мягкой литой стали. Он неподвижно укреплен в приборе внутри катушки (рамки). Воздушный зазор между полюсными надставками и цилиндром делается очень малым, чтобы обеспечить постоянство магнитной индукции и радиальное направление сил магнитного поля, пронизывающего цилиндр.

Каркас рамки изготовляют из алюминия. На него нанесена обмотка, состоящая из витков тонкой медной или алюминиевой проволоки с шелковой изоляцией. Вес всей подвижной части магнитоэлектрического прибора не превышает нескольких граммов.

Спиральные пружины 3 рамки изготовляются из бронзы. Их назначение — создавать про-

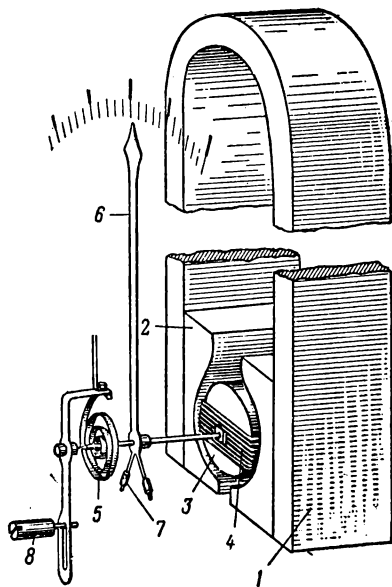


Рис. 378. Конструкция основных деталей магнитоэлектрического прибора

тивдействующий момент и в то же время быть токопроводящими частями прибора.

При повороте рамки в ее каркасе индуцируются вихревые токи, которые поглощают энергию движения подвижной части прибора, благодаря чему достигается быстрое успокоение стрелки прибора.

На рис. 378 приведена конструкция одного из типов магнитоэлектрических приборов. Здесь ясно видны подковообразный

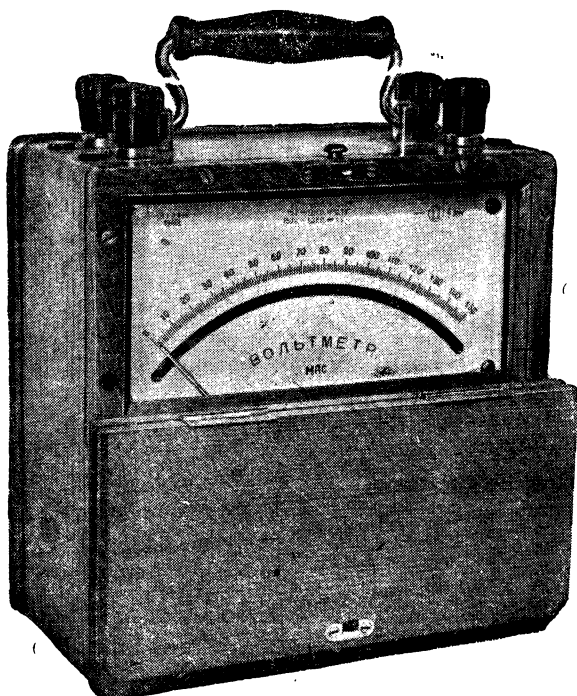


Рис. 379. Переносный вольтметр магнитоэлектрической системы

магнит 1, полюсные надставки 2, рамка прибора 4, стальной цилиндр 3 и другие детали. На рис. 379 показан переносный вольтметр магнитоэлектрической системы.

Магнитоэлектрические приборы пригодны для измерения только постоянных токов. Поэтому у зажимов приборов обычно имеются отметки (+) и (-); зажим со знаком (+) надо включать в сторону положительного полюса источника, а зажим со знаком (-) — в сторону отрицательного полюса.

Класс точности лучших образцов приборов магнитоэлектрической системы 0,1—0,2, т. е. предельно высокий. Чувствительность

их также велика. Например, стрелочные гальванометры имеют чувствительность порядка нескольких делений на один микроампер, а нестрелочные. — значительно большую.

Магнитоэлектрические приборы получили широкое распространение в электротехнике. Их применяют в качестве амперметров, вольтметров и омметров.

Благодаря большой точности и чувствительности магнитоэлектрические приборы применяются в качестве гальванометров, т. е. приборов, измеряющих токи очень малой величины и обладающих большой точностью.

Достоинства магнитоэлектрических приборов следующие: большая точность, малое влияние внешних магнитных полей, малое потребление энергии, равномерность шкалы.

Недостатки магнитоэлектрических приборов: пригодность только для постоянного тока, сложность конструкции, высокая стоимость.

§ 172. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Электродинамические приборы основаны на принципе взаимодействия двух катушек с токами (рис. 380). Одна из этих катушек *A*, неподвижно закрепленная в приборе, состоит из небольшого числа витков толстой проволоки, а другая, подвижная, — *B*, обладающая весьма малым весом, состоит из большого числа витков тонкой проволоки.

Если по катушкам проходят токи, то между магнитными потоками катушек возникает сила взаимодействия, стремящаяся установить подвижную катушку так, чтобы через плоскость ее проходил максимальный магнитный поток и чтобы направления магнитных полей обеих катушек внутри них совпали.

Сила взаимодействия катушек в результате действия магнитных потоков пропорциональна произведению токов I_1 и I_2 , протекающих по ним:

$$F = kI_1I_2, \quad (498)$$

где F — сила взаимодействия катушек;

k — коэффициент, зависящий от числа витков катушек и взаимного расположения последних.

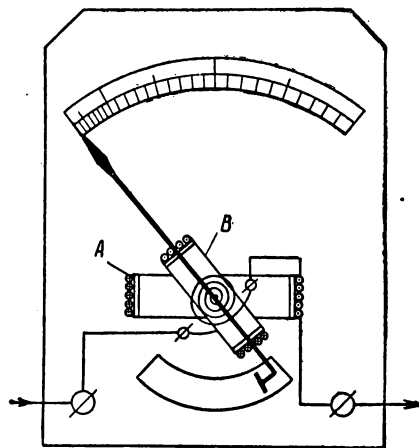


Рис. 380. Принцип устройства прибора электродинамической системы

На рис. 381 показано внутреннее устройство электродинамического прибора. Здесь мы видим неподвижную катушку 1, состоящую из двух секций, последовательно соединенных друг с другом. Секция, находящаяся ближе к нам, показана для наглядности срезанной. Наличие двух секций у неподвижной катушки дает возможность получения внутри нее равномерного магнитного поля. Внутри этой катушки помещена подвижная катушка 2, жестко связанная с осью прибора 3. На верхнем конце оси 3 закреплена спиральная пружина 4 из фосфористой бронзы, служащая для создания противодействующего момента повороту подвижной части прибора и для подвода тока к подвижной катушке. К верхнему концу оси 3 прикреплен также указатель 5 прибора. К нижнему концу оси 3 прикреплено крыло 6

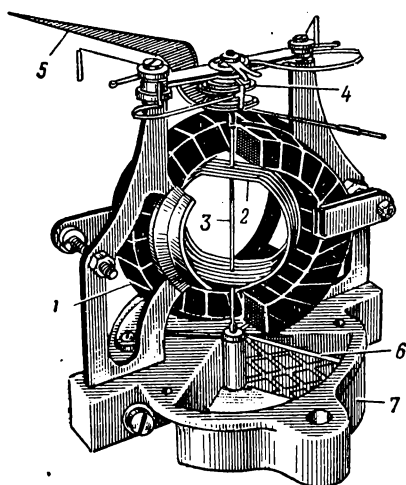


Рис. 381. Внутреннее устройство электродинамического прибора

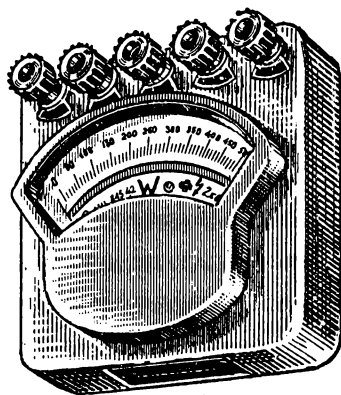


Рис. 382. Ваттметр электродинамической системы

воздушного успокоителя, которое при повороте оси перемещается в воздушной камере 7 (показана открытой). Движению крыла 6 оказывает сопротивление воздух в камере 7, и этим осуществляется торможение движения подвижной части прибора.

На рис. 382 показан внешний вид одного из типов электродинамических ваттметров. Этот ваттметр относится к приборам без стали. На практике существуют и электродинамические приборы со сталью, называемые ферродинамическими приборами. В них для усиления магнитного потока внутри катушек применены магнитопроводы из мягкой стали или из специальных сплавов. Приборы со сталью имеют то преимущество, что они имеют значительно больший вращающий момент, мало зависимы от посторонних магнитных полей. Однако они менее точны по сравнению с приборами без стали.

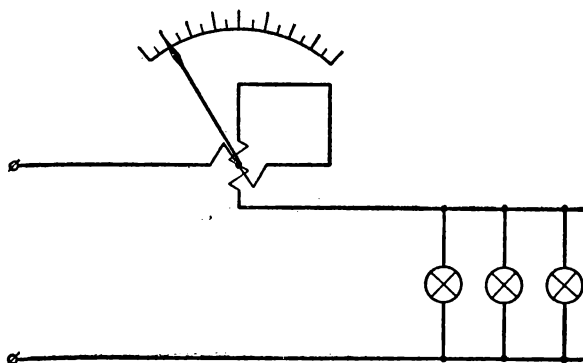


Рис. 383. Схема включения в цепь электродинамического амперметра с последовательно соединенными катушками

Катушки в электродинамических приборах в зависимости от их назначения и требований, предъявляемых к ним, соединяются последовательно или параллельно.

В вольтметрах электродинамической системы катушки, как правило, соединены последовательно. В электродинамических амперметрах применяется как последовательное, так и параллельное соединение катушек: если амперметр предназначен для измерения величин тока, не превышающих $0,5\text{ а}$, то его катушки соединяются последовательно (рис. 383); если же амперметр предназначен для измерения величин тока выше $0,5\text{ а}$, то его катушки соединяются параллельно.

Если в электродинамическом приборе обе катушки соединены последовательно, то по ним проходит один и тот же измеряемый прибором ток (рис. 384). Следовательно, в этом случае сила взаимодействия катушек пропорциональна квадрату величины тока, проходящего в катушках:

$$F = kI^2. \quad (499)$$

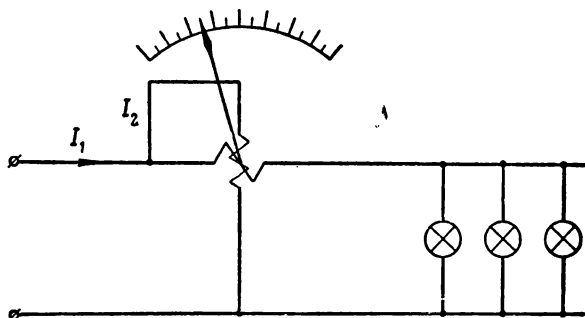


Рис. 384. Схема включения в цепь электродинамического ваттметра

Это значит, что угол отклонения подвижной катушки пропорционален квадрату величины тока, т. е. шкала электродинамического амперметра должна быть неравномерной (квадратичной).

Если электродинамический прибор используется как ваттметр, то неподвижная катушка прибора подключается последовательно с потребителем электрической энергии и через нее проходит весь ток I потребителя.

Подвижная катушка ваттметра присоединяется параллельно цепи так, чтобы на ее концах было приложено напряжение, равное напряжению на зажимах потребителя. В подвижной катушке протекает ток I_2 , пропорциональный приложенному напряжению (рис. 383).

Сила взаимодействия катушек прямо пропорциональна токам I_1 и I_2 в них, т. е.

$$F = kI_1I_2.$$

А так как

$$I_2 = \frac{U}{R_2},$$

где R_2 — сопротивление подвижной катушки, то

$$F = kI_1 \frac{U}{R_2} = k_1UI_1 = k_1P, \quad (500)$$

где P — мощность, потребляемая в цепи;

k_1 — коэффициент пропорциональности.

Из формулы (500) следует, что угол поворота подвижной катушки пропорционален мощности P , расходуемой в цепи; следовательно, шкала электродинамического ваттметра должна быть равномерной.

Если одновременно изменить направление токов в неподвижной и подвижной катушках, то направление силы взаимодействия катушек сохранится неизменным. А это значит, что при питании катушек переменным током подвижная катушка все время стремится повернуться в одном и том же направлении. Следовательно, электродинамический прибор пригоден как для постоянного, так и для переменного тока.

К достоинствам электродинамических приборов следует отнести их пригодность к измерению постоянного и переменного тока (напряжения), возможность измерять ими мощность, высокий класс точности — 0,2 (для приборов без стали).

Недостатки электродинамических приборов (без стали) — зависимость показаний от внешних магнитных полей, даже такого слабого, как поле земного шара, чувствительность к перегрузкам, сложность конструкции и увеличение погрешности прибора с ростом частоты.

§ 173. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

В электромагнитных приборах используется взаимодействие катушки с током и намагниченным им стальным сердечником, имеющим форму легкой пластинки (лепестка).

На рис. 385 приведена схема устройства одного из наиболее употребительных электромагнитных приборов. Здесь показана неподвижная катушка 1, концы обмотки которой присоединены к зажимам 2—2 прибора. В катушке имеется узкая щель 3, в которую входит стальная пластинка 4 при втягивании ее внутрь магнитного поля катушки. Эта пластинка посажена эксцентрично на подвижную ось 5 прибора и жестко скреплена с ней. При повороте пластинки ось также поворачивается, а вместе с ней поворачивается и стрелка 6 прибора. Спиральная пружина 7, закрепленная одним концом на оси 5, а другим — на корпусе прибора, имеет назначением создавать противодействующий момент в приборе. Воздушный успокоитель состоит из пустотелой коробки 8. Внутри коробки перемещается воздушный поршень 9, приводимый в движение осью 5, с которой он жестко скреплен.

На рис. 386 показан внешний вид одного из типов электромагнитных амперметров.

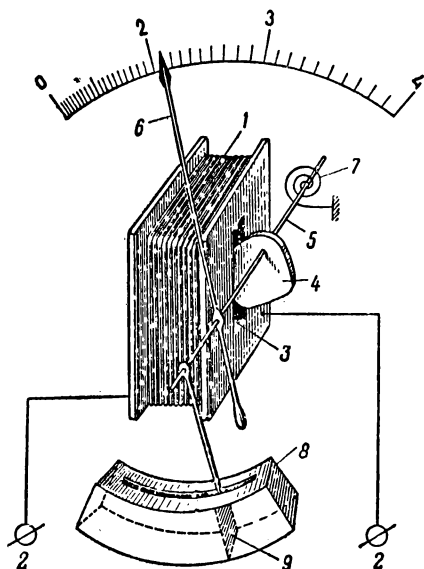


Рис. 385. Схема устройства электромагнитного прибора

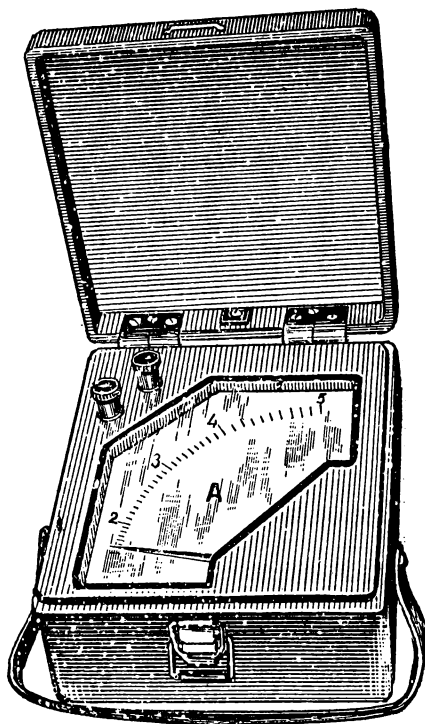


Рис. 386. Амперметр электромагнитной системы

Сила, с которой железный сердечник (пластинка) втягивается внутрь катушки, пропорциональна току I и величине магнитной индукции B поля катушки:

$$F = kBI, \quad (501)$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Степень намагничивания железной пластинки A прибора практически пропорциональна величине тока. Следовательно, сила, действующая на пластинку A в магнитном поле катушки и стремящаяся втянуть ее внутрь катушки, примерно пропорциональна квадрату тока:

$$F = kI^2.$$

Это значит, что угол поворота стрелки (подвижной части) прибора при относительно малых токах практически пропорционален квадрату тока:

$$\alpha = CI^2, \quad (502)$$

и в соответствии с этим шкала прибора при малых величинах измеряемого тока обычно приближается к квадратичной.

Электромагнитные приборы устаревших типов имеют обычно низкий класс точности (1,5—2,5) из-за несовершенства конструкции и невысокого качества их ферромагнитных материалов. В настоящее время советская электропромышленность выпускает электромагнитные приборы класса точности 0,5, применяя в них высококачественные железо-никелевые сплавы, типа пермаллоя. Для устранения влияния внешних магнитных полей на показания электромагнитных приборов последние делаются астатическими. Астатический прибор электромагнитной системы состоит из двух катушек и двух сердечников, сидящих на общей оси. Под влиянием магнитного поля катушек каждый сердечник втягивается в свою катушку, при этом они поворачивают ось со стрелкой согласованно, т. е. в одну и ту же сторону. Внешние магнитные поля воздействуют на сердечники таким образом, что один из них стремится повернуться по часовой стрелке, а другой — против часовой стрелки. Благодаря этому результирующий вращающий момент подвижной системы прибора равен нулю и прибор не реагирует на внешнее магнитное поле.

Достоинства электромагнитных приборов следующие: пригодность для постоянного и переменного тока, возможность измерения относительно больших токов без шунтирования или трансформации тока, надежность в эксплуатации, простота конструкции.

Недостатки электромагнитных приборов: неравномерность шкалы, зависимость показаний от влияния внешних магнитных полей.

§ 174. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В электростатических приборах используется взаимодействие проводников, заряженных разноименным электричеством.

На рис. 387 показано устройство одного из применяющихся в современной практике электростатических вольтметров. Две плоские, изолированные друг от друга неподвижные металлические пластины 1 и 2 расположены параллельно друг другу. Через зажимы 7 и 8 они присоединяются к точкам цепи, между которыми требуется измерить напряжение. Между этими пластинами

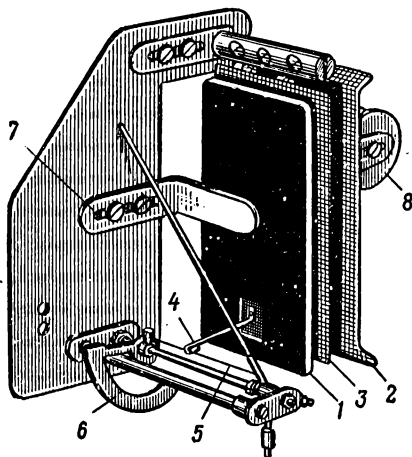


Рис. 387. Устройство электростатического вольтметра

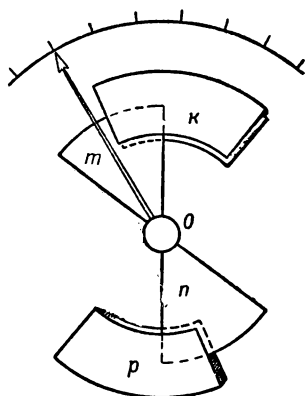


Рис. 388. Схематическое изображение электростатического измерительного прибора

свободно подвешена пластина 3, электрически соединенная с пластиной 1. К нижней части пластины 3 присоединена тяга 4, которая другим своим концом механически соединена с тонкой металлической нитью 5. Если данный прибор подключить под напряжение электрической цепи, то пластины 1 и 3 зарядятся одноименным электрическим зарядом, а пластина 2 — зарядом противоположного знака. Это приводит к тому, что пластина 3 отталкивается от пластины 1 и притягивается к пластине 2. Чем больше напряжение на зажимах 7 и 8 прибора, тем больше величины электрических зарядов на пластинах 1, 2 и 3, тем с большей силой отталкивается пластина 3 от пластины 1 и притягивается к пластине 2. Противодействующий момент в приборе создается силой тяжести противовеса 6.

На рис. 388 схематически изображено устройство электростатического прибора, в котором подвижные пластины поворачиваются внутри камер, образованных системой параллельно расположенных неподвижных пластин. Подвижные и неподвижные пластины здесь также взаимодействуют благодаря наличию на них

разноименных электрических зарядов. Сила взаимодействия пропорциональна квадрату напряжения, приложенного к зажимам прибора:

$$F = kU^2, \quad (503)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора.

Чувствительность прибора увеличивается с числом камер, с увеличением рабочих поверхностей подвижных секторов и неподвижных пластин и с уменьшением расстояния между ними.

Если подвижным секторам придать соответствующую форму, то в электростатическом приборе можно получить почти равномерную шкалу.

Электростатические приборы можно использовать только как вольтметры.

Достоинства электростатических приборов следующие: отсутствие потребления приборами электрической энергии, независимость показаний приборов от магнитных полей, от частоты измеряемого напряжения и от температуры окружающей среды.

Недостатки электростатических приборов: зависимость показаний приборов от внешних электрических полей, неравномерность шкалы, влияние влажности воздуха на показания прибора.

§ 175. ПРИБОРЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

В приборах термоэлектрической системы используется термоэлектрическое явление.

Если спаять концы, например, медной и висмутовой проволок и нагреть место спая, оставив другие концы их холодными, то свободные электроны начнут переходить из медной проволоки в висмутовую. В результате этого медная проволока зарядится положительным электричеством, а висмутовая — отрицательным.

Переход свободных электронов из медной проволоки в висмутовую будет продолжаться до тех пор, пока не уравновесятся две противоречивые силы. С одной стороны, это силы стороннего электрического поля, перемещающие свободные электроны из медной проволоки в висмутовую. С другой стороны, это силы электростатического поля системы разобщенных разноименных электрических зарядов, размещенных на холодных концах медной (положительный заряд) и висмутовой (отрицательный заряд) проволок. В момент наступления равновесия этих сил термоэлектродвижущая сила E в системе медь — висмут будет численно равна разности потенциалов на холодных концах медной и висмутовой проволок, т. е.

$$|E| = |U|, \text{ или } E = -U,$$

где E — термоэлектродвижущая сила;

U — разность потенциалов на холодных концах медной и висмутовой проволок.

Система, состоящая из спаянных между собой разнородных металлов и создающая термоэлектродвижущую силу, называется термопарой.

В современной электротехнике наиболее употребительны термопары: медь — константан, дающая термоэлектродвижущую силу, равную примерно 40 мкв на 1°Ц нагретого спаев; железо — константан — 50 мкв на 1°Ц ; манганин — константан — 50 мкв на 1°Ц .

Термоэлектродвижущая сила, развиваемая в термопаре, пропорциональна разности температур нагретого и холодного спаев металлов.

Если холодные концы термопары, например медь — висмут, соединить, то в этой замкнутой цепи возникнет электрический ток, который будет протекать через нагретый спай от висмута к меди. Электрический ток, возникший в цепи под действием сторонних термоэлектрических сил, называется термоэлектрическим током.

Термоэлементы нашли широкое применение в современной электротехнике, и в частности в термоэлектрических измерительных приборах.

Термоэлектрический прибор состоит из магнитоэлектрического прибора и термопреобразователя. В свою очередь термопреобразователь состоит из термопары или термобатареи и электрического нагревателя.

На рис. 389 приведена принципиальная схема термоэлектрического измерительного прибора с контактным термопреобразователем. Нагреватель термопреобразователя представляет собой токопроводящую проволочку $1-2$, через которую проходит весь измеряемый прибором ток I . Термопара 3 своим спаем припаяна к проволочке $1-2$. Свободные (холодные) концы термопары присоединены к зажимам 4 и 5 , а к последним в свою очередь подключен миллиамперметр (амперметр или гальванометр) магнитоэлектрической системы. Таким образом, термопара термопреобразователя совместно с миллиамперметром образует замкнутую цепь.

Измеряемый ток I , проходя по проволочке $1-2$, нагревает ее, а следовательно, нагревает и спай термопары. В результате этого в термопаре создается термоэлектродвижущая сила, возникает постоянный ток, который отклоняет стрелку магнитоэлектрического прибора (миллиамперметра) на некоторый угол.

Термопреобразователь, показанный на рис. 389, называется контактным, так как его термопара имеет непосредственный электрический контакт с проволочкой $1-2$ (подогревателем).

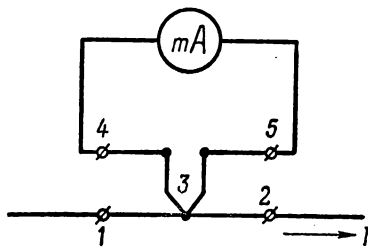


Рис. 389. Схема термоэлектрического прибора

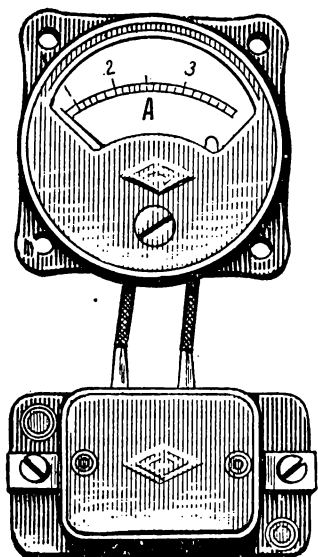


Рис. 390. Амперметр с термопреобразователем

Достоинство его заключается в том, что его термопара более чувствительна к изменению температуры подогревателя. Но в то же время он обладает существенным недостатком: при измерении токов высокой частоты эти токи могут ответвляться в цепь постоянного тока термопары. Этим недостатком не обладают бесконтактные термопреобразователи, потому что их термопары не имеют электрического контакта с подогревателем. Но в то же время они менее чувствительны, поскольку влияние температуры подогревателя на их термопары несколько слабее.

Для увеличения чувствительности термоэлектрических приборов в них применяют термоэлектрические батареи, состоящие из ряда последовательно соединенных термоэлементов.

Постоянный термоэлектрический ток пропорционален термоэлектродвижущей силе, а последняя в свою очередь пропорциональна температуре нити нагревателя, т. е. квадрату измеряемого тока. Следовательно, постоянный термоэлектрический ток пропорционален квадрату измеряемого тока. А это значит, что показания магнитоэлектрического прибора в цепи с термопреобразователем будут пропорциональны квадрату тока:

$$\alpha = CI^2,$$

т. е. шкала термоэлектрического прибора неравномерная.

Термоэлектрические приборы весьма успешно применяются при измерении токов высокой частоты, нередко до нескольких мегагерц. Эти приборы гораздо чувствительнее тепловых и дают меньшую погрешность измерений благодаря относительно короткой проволоке подогревателя. Поэтому тепловые измерительные приборы постепенно вытесняются из практики термоэлектрическими.

Термоэлектрические приборы весьма чувствительны к перегрузкам, а поэтому необходимо весьма внимательно относиться к эксплуатации этих приборов, так как при незначительном отклонении от номинального тока в сторону его повышения термопреобразователь легко перегорает. На рис. 390 показан общий вид амперметра с термопреобразователем, выделенным отдельно от магнитоэлектрического прибора.

Достоинства термоэлектрических приборов следующие: пригодность как для постоянного, так и для переменного тока, неза-

висимость показаний от частоты тока, малое потребление энергии, большая точность и чувствительность.

Недостатки термоэлектрических приборов: чувствительность к перегрузкам током, неравномерность шкалы, относительно малый срок службы.

§ 176. ПРИБОРЫ ВИБРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

К приборам вибрационной системы относятся частотомеры, при помощи которых измеряется частота переменных токов.

Вибрационный частотомер основан на использовании механического резонанса вибрирующего тела. На рис. 391 схематически показан принцип действия вибрационного частотомера. Электромагнит A питается током некоторой частоты и создает переменное магнитное поле той же частоты. Перед полюсной надеткой M электромагнита расположена система якорьков b в виде упругих тонких стальных пластинок, заделанных одними концами на общей основе a (на рисунке показана только одна такая пластинка). Каждая из этих пластинок имеет свой собственный период (частоту) колебаний. За один период колебаний тока каждая из пластинок дважды испытывает притягивающую силу электромагнита. Но эта вынуждающая к колебаниям сила больше всего воздействует на ту пластинку, которая имеет собственную частоту колебаний, совпадающую с частотой колебаний вынуждающей внешней силы. По наибольшей амплитуде колебаний пластинки можно судить о числе колебаний электрического тока в цепи.

Для того чтобы легко можно было наблюдать за колебаниями вибрирующих пластинок частотомера, концы их снабжают окрашенными в белый цвет площадками. На рис. 392 показана шкала вибрационного частотомера, включенного для измерения частоты 50 гц.

Вибрационные частотомеры применимы для измерения только низких частот.

На рис. 393 показан внешний вид вибрационного частотомера щитового типа.

Достоинства вибрационных приборов следующие: относи-

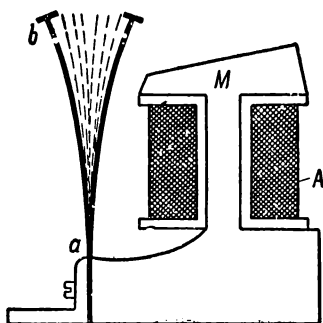


Рис. 391. Прибор вибрационной системы

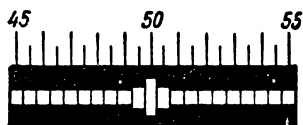


Рис. 392. Шкала вибрационного частотомера, включенного для измерения частоты 50 гц

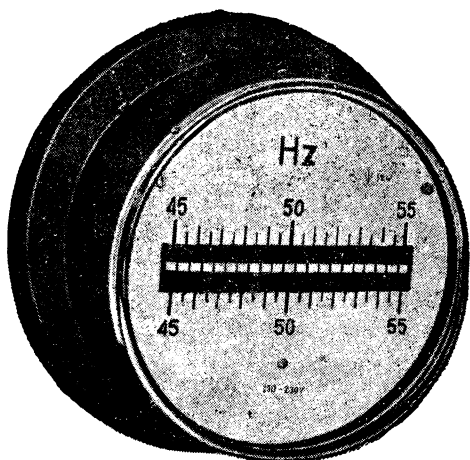


Рис. 393. Вибрационный частотомер

расход электрической энергии в цепях. На рис. 394 показана принципиальная схема электродинамического счетчика постоянного тока.

Через неподвижные катушки B_1 и B_2 проходит весь ток I_1 , потребляемый электрической цепью. В магнитном поле, которое создается током, проходящим через катушки, помещен якорь A . Он покоится на подпятнике a и может вращаться свободно вокруг своей оси.

Обмотка якоря секционирована, т. е. разбита на отдельные самостоятельные катушки — секции, концы которых присоединены к коллекторным пластинам K якоря. Ток I_2 к обмотке якоря подводится через неподвижные щетки b , которые прижимаются к коллекторным пластинам. При вращении якоря щетки скользят по поверхностям коллекторных пластин. Для предохранения тонкой обмотки якоря от перегрева током последовательно с обмоткой введено сопротивление R_1 . Катушка C , включенная последовательно с якорем, создает дополнительное магнитное поле, компенсирующее механические

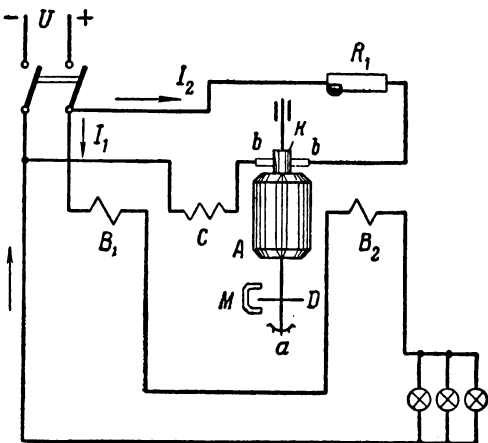


Рис. 394. Принципиальная схема электродинамического счетчика

тельно малая зависимость показаний от изменения напряжения в сети, надежность в работе, простота конструкции.

Недостатки вибрационных приборов: зависимость их показаний от внешних механических вибраций, прерывность шкалы, невозможность измерения высоких частот.

§ 177. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СЧЕТЧИКИ

Счетчиками электрической энергии называют приборы, учитывающие

потери энергии в счетчике, например на трение в подпятнике, трение щеток о коллектор и т. п. Эта катушка называется компенсационной.

Якорь включен в цепь параллельно, поэтому через его обмотку проходит ток, пропорциональный напряжению U .

Принцип действия счетчика сводится к следующему.

Щетки, соприкасаясь с парой коллекторных пластин, присоединяют к сети одну из секций обмотки якоря, так что только в этой секции протекает ток I_2 , который взаимодействует с магнитным полем, создаваемым неподвижными катушками B_1 и B_2 . Под влиянием силы их взаимодействия секция якоря, «оживленная» током I_2 , стремится установиться в магнитном поле катушек B_1 и B_2 так, чтобы ее пронизывал максимальный магнитный поток и чтобы направления магнитных полей катушек B_1 и B_2 и самой секции внутри последней были одинаковыми. Но когда эта секция вместе с якорем повернется на некоторый угол α , щетки перейдут на следующую пару коллекторных пластин, и теперь окажется «оживленной» током следующая очередная секция обмотки якоря, которая также повернется на некоторый угол α , и т. д. В результате якорь будет непрерывно вращаться вокруг своей оси с постоянной скоростью.

Вращающий момент, развиваемый подвижной системой счетчика, пропорционален величине магнитной индукции B , создаваемой неподвижными катушками, и току I_2 в обмотке якоря. Так как в системе неподвижных катушек нет железа, то магнитную индукцию можно считать пропорциональной величине тока I_1 неподвижной катушки, а ток в якоря I_2 — пропорциональным приложенному к счетчику напряжению U . Следовательно, вращающий момент подвижной системы счетчика пропорционален напряжению U в цепи и току на грузки I_1 :

$$M = kUI_1, \quad (504)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора.

Вместе с якорем вращается сидящий на его оси алюминиевый диск D , который находится в магнитном поле постоянного магнита M . Индуктированные в диске вихревые токи тормозят вращение якоря и этим регулируют число оборотов якоря так, что оно пропорционально мощности, расходуемой в цепи:

$$P = c_1 n_1, \quad (505)$$

где n_1 — число оборотов счетчика в секунду;

c_1 — мощность, соответствующая одному обороту счетчика в секунду.

Вся же электрическая энергия, израсходованная в цепи, пропорциональна числу оборотов якоря счетчика:

$$A = Cn, \quad (506)$$

где C — постоянная счетчика, соответствующая количеству электрической энергии, отмечаемому счетчиком за один оборот своей подвижной части.

Вращение якоря передается счетному механизму, регистрирующему электрическую энергию на циферблате.

На точность показания электродинамического счетчика влияет изменение внешней температуры, изменяющее электрическое сопротивление диска, посторонние магнитные поля и колебания напряжения в сети.

§ 178. ИНДУКЦИОННЫЕ СЧЕТЧИКИ

В цепях переменного тока широкое применение получили индукционные счетчики.

На рис. 395 схематически изображено устройство одного из типов индукционных счетчиков. На нижний железный сердечник

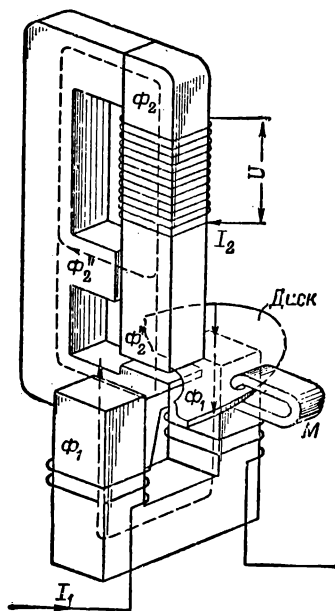


Рис. 395. Принципиальная схема индукционного счетчика

П-образной формы надеты две последовательно соединенные катушки, состоящие из небольшого числа витков толстой проволоки, по которым проходит весь ток нагрузки I_1 . Так как магнитный поток Φ_1 , создаваемый током I_1 , большую часть своего пути проходит по воздуху, то величина его пропорциональна току I_1 и почти совпадает с ним по фазе.

На другой сердечник, расположенный выше первого, нанесена обмотка из большого числа витков тонкой проволоки, присоединенная параллельно к цепи. Ток I_2 , протекающий по этой катушке, создает магнитный поток Φ_2 , который распределяется по двум параллельным магнитным цепям. Часть этого потока Φ_2 замыкается через диск, находящийся в междужелезном пространстве. Другая часть потока Φ_2 , замыкается через магнитный шунт, благодаря которому увеличивается индуктивное сопротивление параллельной обмотки

электромагнита, что необходимо для установления пропорциональности между вращающим моментом подвижной системы счетчика и мощностью, расходуемой в цепи.

Магнитный поток Φ_2' , пронизывающий диск, отстает по фазе от напряжения U на угол, близкий к $\frac{\pi}{2}$.

Если ток I_1 отстает по фазе от приложенного напряжения на угол φ , то потоки Φ_1 и Φ_2 сдвинуты по фазе один относительно другого на угол $\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)$.

Магнитный поток Φ_1 индуцирует в подвижном алюминиевом диске вихревые токи $I_{в.т.}$, которые, взаимодействуя с магнитным потоком Φ_2 , создают вращающий момент, пропорциональный произведению амплитуд магнитных потоков и синусу угла между ними:

$$M = k\Phi_1\Phi_2' \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) = k\Phi_1\Phi_2' \cdot \cos\varphi, \quad (507)$$

или

$$M = cUI \cdot \cos\varphi = cP \quad (508)$$

(так как Φ_1 и Φ_2' пропорциональны соответственно величине тока I и напряжению U), где c — коэффициент пропорциональности; P — мощность, расходуемая в цепи.

Постоянный магнит M , в магнитном поле которого вращается диск, создает в диске вихревые токи, поглощающие механическую энергию подвижной системы счетчика, и этим регулирует число оборотов счетчика.

К достоинствам счетчиков следует отнести допускаемую ими перегрузку, малое собственное потребление мощности (около 1,5 *вт*), прочность конструкции и невысокую стоимость.

Недостатки счетчика: влияние частоты и температуры на показания его, относительное увеличение оборотов счетчика при малой нагрузке и повышении напряжения.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

§ 179. ИЗМЕРЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ТОКА

Для непосредственного измерения тока в цепи применяются приборы, называемые амперметрами. При относительно малых токах применяют миллиамперметры, дающие показания непосредственно в миллиамперах, или гальванометры, измеряющие токи порядка микроампер.

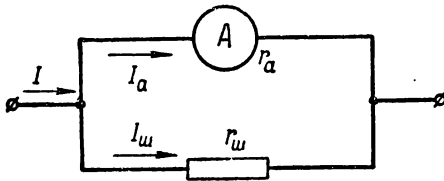


Рис. 396. Схема включения амперметра с шунтом

Для измерения постоянных токов применяют амперметры магнитоэлектрической, электродинамической и тепловой систем. Переменные же токи можно измерять амперметрами всех систем, кроме магнитоэлектрической.

Амперметр включается в цепь так, чтобы через него проходил весь измеряемый ток, т. е. последовательно с тем участком цепи, где необходимо измерить величину тока.

В тех случаях, когда желают расширить пределы измерения амперметра, его присоединяют параллельно к шунту (рис. 396).

Чем меньше сопротивление шунта по сравнению с сопротивлением амперметра, тем большая часть измеряемого тока отводится в шунт и меньшая — в амперметр.

Коэффициентом шунта называется число, показывающее, во сколько раз предельный ток, измеряемый амперметром с шунтом, больше предельного тока, измеряемого амперметром без шунта:

$$n = \frac{I}{I_a}, \quad (509)$$

где n — коэффициент шунта;

I_a — предельный ток, на который рассчитан амперметр без шунта;

I — предельный ток, на который рассчитывается амперметр с шунтом.

Рассчитать шунт к амперметру — значит определить сопротивление его по заданному сопротивлению амперметра и коэффициенту шунта.

Исходя из схемы, изображенной на рис. 396, можно написать, что

$$I = I_{\text{ш}} + I_a, \quad (1)$$

$$\frac{I_{\text{ш}}}{I_a} = \frac{r_a}{r_{\text{ш}}}, \quad (2)$$

где I — предельный ток амперметра, на который рассчитывается амперметр с шунтом;

$I_{\text{ш}}$ — ток в шунте;

I_a — предельный ток, на который рассчитан амперметр без шунта;

$r_{\text{ш}}$ — сопротивление шунта;

r_a — сопротивление амперметра.

Разделив левую и правую части равенства (1) на I_a , получим:

$$\frac{I}{I_a} = \frac{I_{\text{ш}}}{I_a} + 1.$$

Но, принимая во внимание, что $\frac{I}{I_a} = n$ и $\frac{I_{\text{ш}}}{I_a} = \frac{r_a}{r_{\text{ш}}}$, вместо последнего равенства можем написать, что

$$n = \frac{r_a}{r_{\text{ш}}} + 1,$$

откуда найдем, что

$$r_{\text{ш}} = \frac{r_a}{n-1}, \quad (510)$$

т. е. сопротивление шунта меньше сопротивления амперметра в число раз, равное шунтовому коэффициенту без единицы.

Пример 200. Амперметр рассчитан на максимальный ток $I_a = 0,5$ а. Требуется расширить пределы измерения данного амперметра до $I = 5$ а, т. е. подобрать к нему шунт, если сопротивление амперметра $r_a = 0,81$ ом.

Решение. Коэффициент шунта

$$n = \frac{I}{I_a} = \frac{5}{0,5} = 10.$$

Сопротивление шунта

$$r_{\text{ш}} = \frac{r_a}{n-1} = \frac{0,81}{10-1} = 0,09 \text{ ом.}$$

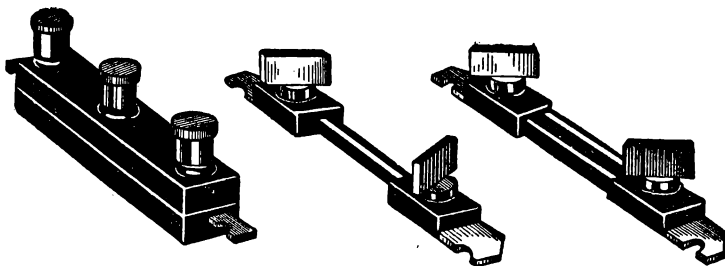


Рис. 397. Шунты для переносных приборов

На рис. 397 показан внешний вид шунтов к переносным приборам.

Шунты монтируются внутри амперметра или же подключаются к нему вне его корпуса. На шунте, прилагаемом к данному амперметру, отмечается предельное значение того тока, который может измерить прибор с данным шунтом, или же цена деления прибора, например $1^\circ = 0,1 \text{ а}$ и т. д.

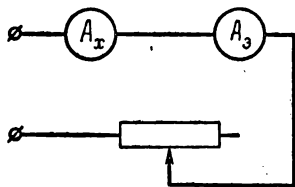


Рис. 398. Схема включения амперметра для его проверки

Материалом для изготовления шунтов обычно служит манганин, обладающий большим удельным сопротивлением и очень малым температурным коэффициентом.

Следует помнить, что амперметр вместе с шунтом имеет сопротивление

$$r = \frac{r_a r_{ш}}{r_a + r_{ш}},$$

что должно быть учтено при всякого рода измерениях, где придется считаться с сопротивлением амперметра.

С течением времени в силу тех или иных причин величина погрешности амперметра возрастает и возникает необходимость

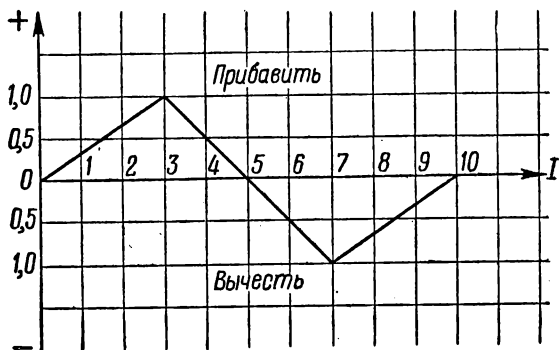


Рис. 399. Кривая поправок градуировки амперметра

его проверки. Проверяют амперметр A_x , сличая его показания с показаниями эталонного амперметра A_e , включенного последовательно с ним в цепь (рис. 398).

Обычно при проверке амперметра строят кривую поправок (рис. 399): по одной оси откладывают показания проверяемого амперметра, а по другой оси — поправки, т. е. те величины, которые надо прибавить к показаниям амперметра, чтобы получить истинное значение измеряемой величины. Как видно из графика, поправки могут быть положительными и отрицательными.

§ 180. ИЗМЕРЕНИЕ НАПЯЖЕНИЯ

Напряжение в цепи в зависимости от его величины измеряется вольтметром или милливольтметром.

В цепях постоянного тока, когда требуется относительно большая точность измерений, применяются вольтметры магнитоэлектрической системы, при помощи которых можно измерить напряжения от долей вольта до нескольких сотен вольт. Там, где не требуется большой точности измерений, применяются вольтметры электромагнитной системы, при помощи которых можно измерять напряжения от единиц до нескольких сотен вольт,

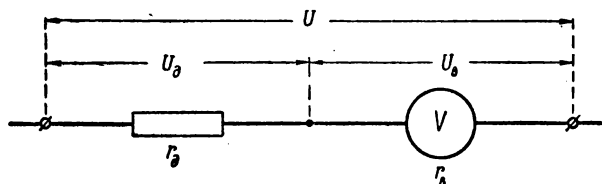


Рис. 400. Схема включения вольтметра с добавочным сопротивлением

Высокие напряжения в несколько тысяч вольт обычно измеряются электростатическими вольтметрами.

В цепях переменного тока применимы все типы вольтметров, за исключением вольтметров магнитоэлектрической системы.

Вольтметр включается в цепь так, что его зажимы подключаются к тем точкам, между которыми измеряется напряжение.

Чтобы расширить пределы измерения вольтметра, его соединяют последовательно с добавочным сопротивлением (рис. 400).

Чем больше добавочное сопротивление по сравнению с сопротивлением вольтметра, тем большая часть измеряемого напряжения будет израсходована в нем и меньшая — в самом вольтметре.

Переводным множителем называется число, показывающее, во сколько раз предельное напряжение, измеряемое вольтметром с добавочным сопротивлением, больше предельного

напряжения, на которое рассчитан вольтметр без добавочного сопротивления:

$$m = \frac{U}{U_B},$$

где m — переводный множитель;

U_B — предельное напряжение, на которое рассчитан вольтметр без добавочного сопротивления;

U — предельное напряжение, на которое рассчитывается вольтметр с добавочным сопротивлением.

Исходя из схемы, изображенной на рис. 400, можно написать, что

$$U = U_d + U_B, \quad (1)$$

$$\frac{U_d}{U_B} = \frac{r_d}{r_B}, \quad (2)$$

где U — предельное напряжение, на которое рассчитывается вольтметр с добавочным сопротивлением;

U_B — предельное напряжение, на которое рассчитан вольтметр без добавочного сопротивления;

U_d — напряжение, теряемое в дополнительном сопротивлении;

r_B — сопротивление вольтметра;

r_d — добавочное сопротивление.

Разделив левую и правую части равенства (1) на U_B , получим:

$$\frac{U}{U_B} = 1 + \frac{U_d}{U_B}.$$

Но, принимая во внимание, что $\frac{U}{U_B} = m$ и $\frac{U_d}{U_B} = \frac{r_d}{r_B}$, вместо последнего равенства можем написать, что

$$m = 1 + \frac{r_d}{r_B},$$

откуда найдем, что

$$r_d = (m - 1) r_B, \quad (511)$$

т. е. добавочное сопротивление больше сопротивления вольтметра в число раз, равное переводному множителю без единицы.

Пример 201. Вольтметр рассчитан на максимальное напряжение $U_B = 3$ в. Требуется рассчитать добавочное сопротивление к вольтметру, если пределы измерения его необходимо расширить до величины $U = 30$ в. Сопротивление вольтметра $r_B = 500$ ом.

Решение. Переводный множитель

$$m = \frac{U}{U_a} = \frac{30}{3} = 10.$$

Добавочное сопротивление

$$r_d = (m - 1) r_v = (10 - 1) \cdot 500 = 4500 \text{ ом.}$$

Добавочное сопротивление монтируется внутри вольтметра или же присоединяется к нему вне его корпуса. Оно обычно изготовляется из манганиновой проволоки с изоляцией, намотанной на цилиндрической формы каркас или же на тонкую плоскую пластинку из изолирующего материала. Чтобы сделать катушки добавочного сопротивления безындукционными, их выполняют в виде бифилярной обмотки.

В некоторых случаях требуется, чтобы один и тот же вольтметр был рассчитан на различные пределы измерения напряжения.

Тогда для него добавочные сопротивления вводят в виде отдельных секций, которые включают по мере необходимости.

Проверяют и градуируют вольтметр, сличая его показания с показаниями эталонного вольтметра V_a , включенного параллельно с ним в цепь (рис. 401). В результате проверки вольтметра к нему прилагают кривую поправок, аналогичную кривой поправок для амперметра (рис. 399).

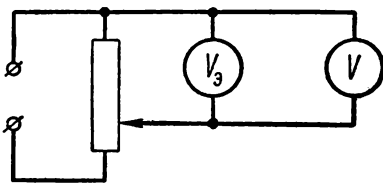


Рис. 401. Схема включения вольтметра для его проверки

§ 181. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Если известно напряжение U , теряемое на данном участке цепи, и ток I , протекающий по нему, то, пользуясь формулой закона Ома для участка цепи, можно определить сопротивление последнего:

$$r = \frac{U}{I}.$$

Следовательно, если даны показания вольтметра и амперметра, включенных в заданный участок цепи, то по ним можно определить сопротивление участка. Этот метод определения сопротивления участка цепи называется методом амперметра и вольтметра.

Для измерения сопротивления r_x по методу амперметра и вольтметра соберем цепь по схеме, приведенной на рис. 402. Эта цепь состоит из источника электрической энергии с постоянной электродвижущей силой и последовательно соединенных с ним

искомым сопротивлением r_x и амперметром A . Вольтметр V подключен к зажимам источника электрической энергии.

При этом способе включения приборов амперметр измерит ток I , проходящий через измеряемое сопротивление r_x , а вольтметр покажет напряжение, которое теряется не только в неизвестном сопротивлении r_x , но и в амперметре A , обладающем сопротивлением r_a :

$$U = Ir_x + Ir_a.$$

Отсюда следует, что

$$r_x = \frac{U}{I} - r_a, \quad (512)$$

т. е. искомое сопротивление равно частному от деления напряжения U на величину тока I без сопротивления амперметра r_a .

Если сопротивление $r_a \ll r_x$, то сопротивлением r_a можно пренебречь и положить, что

$$r_x = \frac{U}{I}.$$

Если же сопротивление r_a такого же порядка, что и сопротивление r_x , то сопротивлением r_a пренебрегать нельзя, так как можно допустить очень грубую ошибку при определении r_x .

Следовательно, измерить сопротивление методом вольтметра и амперметра согласно схеме рис. 402 можно только в тех случаях, когда неизвестное сопротивление r_x значительно больше сопротивления амперметра r_a . Покажем это на простейших примерах.

Пример 202. Вольтметр, включенный согласно схеме рис. 402, показал напряжение $U = 100$ в, а амперметр показал ток $I = 0,1$ а. Определить неизвестное сопротивление r_x , если сопротивление амперметра $r_a = 1$ ом.

Решение. По формуле закона Ома находим

$$r_x = \frac{U}{I} = \frac{100}{0,1} = 1000 \text{ ом.}$$

Фактически же согласно формуле (512)

$$r_x = \frac{U}{I} - r_a = 1000 - 1 = 999 \text{ ом,}$$

т. е. ошибка, допущенная при расчете r_x по приближенной формуле, превышает 0,1%.

Пример 203. Вольтметр, включенный согласно схеме рис. 402, показал напряжение $U = 10$ в, а амперметр показал ток $I = 5$ а. Определить неизвестное сопротивление r_x , если сопротивление амперметра $r_a = 1$ ом.

Решение. По формуле закона Ома находим

$$r_x = \frac{U}{I} = \frac{10}{5} = 2 \text{ ом.}$$

Фактически же согласно формуле (512)

$$r_x = \frac{U}{I} - r_a = 2 - 1 = 1 \text{ ом},$$

т. е. при измерении сопротивления r_x по схеме рис. 402 была допущена ошибка на 100% против действительной величины. А это значит, что в данном случае применять вышеуказанную схему для измерения сопротивления r_x рекомендовать нельзя.

Если для определения сопротивления включить амперметр и вольтметр так, как это показано на рис. 403, то вольтметр покажет истинное значение напряжения, приложенное к неиз-

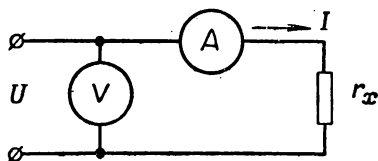


Рис. 402. Схема измерения сопротивления по методу амперметра и вольтметра

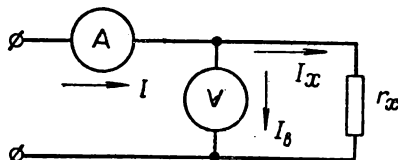


Рис. 403. Схема измерения сопротивления по методу амперметра и вольтметра

вестному сопротивлению r_x . Амперметр же измерит ток I , равный сумме двух токов:

$$I = I_x + I_B,$$

где I_x — ток в сопротивлении r_x ;
 I_B — ток в вольтметре.

Так как

$$I_x = I - I_B,$$

то

$$r_x = \frac{U}{I_x} = \frac{U}{I - I_B},$$

т. е. неизвестное сопротивление равно частному от деления напряжения на разность тока, показываемого амперметром, и тока, протекающего по вольтметру.

Принимая во внимание, что

$$I_B = \frac{U}{r_B},$$

вместо последнего равенства можно написать

$$r_x = \frac{U}{I - \frac{U}{r_B}}. \quad (512')$$

Если $r_B \gg r_x$, то величиной $\frac{U}{r_B}$ можно пренебречь по сравнению с током I и положить, что

$$r_x = \frac{U}{I}.$$

Если же сопротивление r_B того же порядка, что и r_x , то величиной $\frac{U}{r_B}$ пренебрегать нельзя, так как при определении r_x будет допущена грубая ошибка.

Следовательно, схему включения вольтметра и амперметра, изображенную на рис. 403, для определения неизвестного сопротивления r_x можно рекомендовать только для случаев, когда это сопротивление значительно меньше сопротивления вольтметра r_B .

Пример 204. Вольтметр, имеющий сопротивление $r_B = 10\,000$ ом, включен по схеме рис. 403 и показал $U = 100$ в, а амперметр показал ток $I = 10$ а. Определить неизвестное сопротивление r_x .

Решение. По формуле закона Ома находим

$$r_x = \frac{U}{I} = \frac{100}{10} = 10 \text{ ом.}$$

Фактически согласно формуле (512)

$$r_x = \frac{U}{I - \frac{U}{r_B}} = \frac{100}{10 - \frac{100}{10\,000}} = \frac{100}{9,99} = 10,01 \text{ ом,}$$

т. е. ошибка, допущенная при расчете r_x по приближенной формуле, не превышает 0,1%.

Пример 205. Вольтметр, имеющий сопротивление $r_B = 10\,000$ ом, включен по схеме рис. 403 и показал напряжение $U = 100$ в, а амперметр показал ток $I = 0,02$ а. Определить неизвестное сопротивление r_x .

Решение. По формуле закона Ома находим

$$r_x = \frac{U}{I} = \frac{100}{0,02} = 5000 \text{ ом.}$$

Фактически согласно формуле (512)

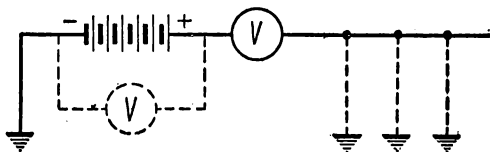
$$r_x = \frac{U}{I - \frac{U}{r_B}} = \frac{100}{0,02 - \frac{100}{10\,000}} = \frac{100}{0,01} = 10\,000 \text{ ом,}$$

т. е. ошибка допущена на 100% против действительной величины. А это значит, что эту схему для определения сопротивления r_x в данном случае рекомендовать нельзя.

§ 182. ИЗМЕРЕНИЕ БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ ВОЛЬТМЕТРА

В тех случаях, когда требуется измерить очень большое сопротивление, например сопротивление изоляции провода, можно применить так называемый метод вольтметра.

На рис. 404 изображена схема включения вольтметра в цепь для измерения сопротивления изоляции провода (кабеля) по отношению к земле. Вольтметр для этой цели берется обычно с большим сопротивлением, от 20 000 до 40 000 *ом*, и со шкалой от 200 до 300 *в*. Источник электрической энергии должен иметь электродвижущую силу, примерно равную 200—300 *в*, и малое внутреннее сопротивление (аккумуляторная батарея).



Вначале вольтметр присоединяют к зажимам источника электрической энергии и измеряют его напряжение при холостом ходе, которое при очень малом внутреннем сопротивлении источника электрической энергии r_0 по сравнению с сопротивлением вольтметра равно электродвижущей силе источника:

Рис. 404. Схема измерения сопротивления изоляции провода методом вольтметра

$$U = E - Ir_0 \approx E;$$

где U — напряжение, измеренное вольтметром на зажимах источника электрической энергии при разомкнутой внешней цепи;

I — ток, протекающий в цепи вольтметра при разомкнутой внешней цепи.

Пример 206. Вольтметр, обладающий сопротивлением $r_B = 20\,000$ *ом*, подключенный к зажимам источника электрической энергии, при разомкнутой внешней цепи показал $U = 200$ *в*. Определить, какую ошибку мы допустили, если напряжение, измеренное вольтметром, приняли за электродвижущую силу источника электрической энергии. Внутреннее сопротивление источника электрической энергии $r_0 = 1$ *ом*.

Решение. Величина тока в цепи вольтметра, присоединенного к зажимам источника электрической энергии при разомкнутой внешней цепи, равна

$$I = \frac{U}{r_B} = \frac{200}{20\,000} = 0,01 \text{ а.}$$

Электродвижущая сила источника электрической энергии

$$E = U + Ir_0 = 200 + 0,01 \cdot 1 = 200,01 \text{ в,}$$

т. е. мы допустили ошибку на 0,005%, если приняли напряжение U за величину электродвижущей силы.

Чем меньше внутреннее сопротивление r_0 источника электрической энергии по сравнению с сопротивлением вольтметра r_B , тем меньше разница между напряжением на зажимах источника электрической энергии, измеренной вольтметром при разомкнутой внешней цепи, и электродвижущей силой его.

Измерив напряжение на зажимах источника электрической энергии при холостом ходе, подключают вольтметр последовательно с проводом, свободный конец которого отключен от потребителя и изолирован от земли.

Так как один из полюсов источника электрической энергии заземлен, то при утечке тока через изоляцию на землю ток потечет от плюс-зажима источника электрической энергии через вольтметр, через изоляцию провода в землю и затем возвратится к минус-зажиму. Вольтметр, включенный последовательно с сопротивлением изоляции r_x , отметит то напряжение U_B , которое теряется в нем самом. Остальная доля электродвижущей силы E источника электрической энергии теряется в сопротивлении изоляции r_x , если пренебречь падением напряжения во всех остальных участках цепи.

Следовательно, на сопротивление изоляции r_x будет затрачено напряжение

$$U_x = E - U_B.$$

Как известно, напряжение в последовательной цепи распределяется пропорционально сопротивлениям участков цепи, т. е. в данном случае

$$\frac{r_x}{r_B} = \frac{E - U_B}{U_B},$$

откуда

$$r_x = \frac{E - U_B}{U_B} r_B. \quad (513)$$

Формула (513) дает возможность определить сопротивление изоляции кабеля, если известны r_B , E и U_B .

Пример 207. Вольтметр, включенный в провод для измерения сопротивления изоляции последнего, показал $U_B = 5$ в. Определить сопротивление изоляции провода, если сопротивление вольтметра $r_B = 25\,000$ ом, электродвижущая сила источника электрической энергии $E = 225$ в.

Решение. По формуле (513) находим

$$r_x = \frac{E - U_B}{U_B} r_B = \frac{225 - 5}{5} \cdot 25\,000 = 1\,100\,000 \text{ ом.}$$

§ 183. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОММЕТРОМ

Омметром называется электроизмерительный прибор, с помощью которого можно непосредственно измерять сопротивление проводников.

Омметр представляет собой прибор магнитоэлектрической системы, отградуированный непосредственно в омах.

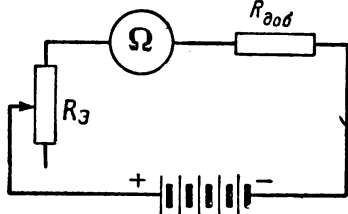


Рис. 405. Схема градуировки омметра

На рис. 405 приведена схема градуировки омметра, где показаны: источник электрической энергии с постоянной электродвижущей силой E (один элемент или батарея элементов), магнитоэлектрический прибор Ω , который предстоит проградуировать в омах, добавочное сопротивление $R_{доб}$ к нему и переменное достаточно точное сопротивление $R_з$, которое можно изменять практически от нуля до бесконечности.

Вначале устанавливают $R_з = \infty$, т. е. практически размыкают цепь, и тогда ток в цепи становится равным нулю. Стрелка прибора Ω занимает крайнее положение на шкале, соответствующее сопротивлению $R_з = \infty$. В соответствии с этим на шкале прибора против острия его стрелки наносят ∞ . Затем устанавливают сопротивление $R_з$, например, равным $R_0 =$

$= 1$ *Мом*. В этом случае в цепи будет проходить некоторый постоянный ток, который отклонит стрелку омметра (Ω) на некоторый угол. В соответствии с этим на шкале прибора против острия стрелки его наносят число 1 *Мом*. Каждому значению переменного сопротивления R_s соответствует строго определенное положение стрелки прибора Ω на его шкале, которое и фиксируется величиной этого сопротивления. В конце градуировки омметра переменное сопротивление R_s закорачивается, т. е. устанавливается равным $R_s = 0$. В этом случае ток в цепи с омметром достигнет максимального значения, а стрелка прибора отклонится на максимальный угол от своего начального (∞) положения. В соответствии с этим на шкале прибора против острия стрелки его наносят 0.

Шкала магнитоэлектрического прибора, проградуированного в омах, получается неравномерной, сильно сжатой в диапазоне больших сопротивлений. Это и понятно, так как чем больше переменное сопротивление R_s по сравнению с сопротивлением омметра Ω и дополнительным сопротивлением, тем грубее становится прибор. Можно считать, что омметр дает показания с достаточной для практики точностью, если измеряемое сопротивление R_x находится в пределах 0,1—10 сопротивления прибора Ω с добавочным сопротивлением $R_{доб}$.

После того как омметр проградуирован, им можно измерять неизвестные сопротивления R_x . Для этой цели в цепи, изображенной на рис. 405, вместо сопротивления R_s включают неизвестное сопротивление R_x и по отклонению стрелки прибора узнают величину измеряемого сопротивления.

Так как омметр Ω проградуирован при строго определенной постоянной электродвижущей силе, то, казалось бы, необходимо иметь такую же электродвижущую силу в цепи омметра и при измерении им сопротивлений. Однако это трудно осуществить, так как электродвижущая сила элементов с течением времени изменяется. Выходом из этого положения является регулировка омметра с помощью магнитного или электрического шунта.

Магнитный шунт, помещаемый непосредственно внутри магнитоэлектрического прибора, представляет собой железную пластинку, которую можно особым механизмом приближать к полюсным надеткам прибора или удалять от него и этим увеличивать или уменьшать величину магнитной индукции магнитного поля подковообразного магнита прибора. Если электродвижущая сила источника электрической энергии в приборе больше нормальной, то магнитный шунт надо приблизить к полюсным надеткам и этим уменьшить магнитную индукцию магнитного поля в пространстве, где расположена рамка прибора. Если же электродвижущая сила E будет меньше нормальной, необходимо магнитный шунт несколько удалить от полюсных надеток подковообразного магнита прибора и этим увеличить магнитную индукцию в междужелезном пространстве.

Электрический шунт омметра представляет собой переменное сопротивление $R_{ш}$, включенное параллельно рамке прибора. Величину этого сопротивления берут примерно в 10—20 раз большей по сравнению с сопротивлением самого магнитоэлектрического прибора. Изменяя величину шунтирующего сопротивления $R_{ш}$, можно легко отрегулировать прибор в соответствии с его градуировкой.

Прежде чем приступить к измерению сопротивлений омметром, необходимо его отрегулировать. При разомкнутой внешней цепи, когда измеряемое сопротивление $R_x = \infty$, стрелка прибора должна показывать на шкале ∞ . Если она не показывает ∞ , необходимо отверткой повернуть винт корректора, который имеется в каждом омметре; так, чтобы стрелка установилась на ∞ . Затем устанавливают внешнее (измеряемое) сопротивление равным нулю, т. е. закорачивают внешние зажимы омметра. Если стрелка омметра в этом случае не устанавливается на нуль, то это значит, что электродвижущая сила источника электрической энергии, питающего ток цепь омметра, отличается от нормальной. Тогда необходимо с помощью магнитного или электрического шунта установить стрелку прибора на нулевое деление шкалы. После этого можно считать, что омметр отрегулирован и им можно измерять сопротивления.

§ 184. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ МОСТИКА

На рис. 406 показана принципиальная схема мостика, состоящая из четырех сопротивлений: r_1 , r_2 , r_3 и r_x , называемых плечами мостика. Эти сопротивления образуют четырехугольник, в одну из «диагоналей» которого включен гальванометр G , дающий возможность обнаружить токи, очень малые по величине. В другую «диагональ» четырехугольника включен источник электрической энергии с постоянной электродвижущей силой. Под диагональю мы подразумеваем здесь не геометрическую диагональ как прямую линию, соединяющую противоположные вершины четырехугольника, а участок цепи, подсоединенный к этим вершинам и нанесенный на чертеж произвольно.

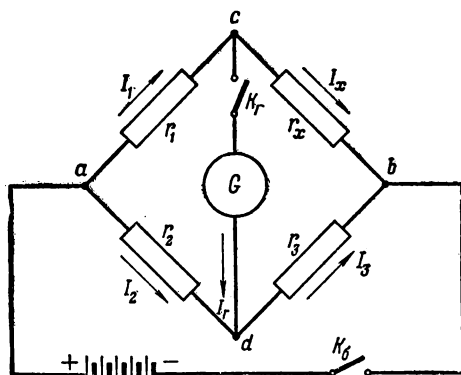


Рис. 406. Принципиальная схема мостика

Сопротивления r_1 и r_2 мостика называются его балансными плечами, сопротивление r_3 — сравнительным и сопротивление r_x — измеряемым.

Гальванометр подключен к точкам c и d , а источник электрической энергии — к точкам a и b схемы мостика. Если замкнуть ключи K_6 и K_7 , то в схеме мостика возникнет электрический ток I , который от плюс-зажима источника электрической энергии идет до узловой точки a схемы, где разделяется на токи I_1 и I_2 и далее идет уже по двум направлениям:

$$I = I_1 + I_2.$$

В плечах мостика с сопротивлениями r_1 и r_2 происходит некоторое падение напряжения

$$U_1 = I_1 r_1 \text{ и } U_2 = I_2 r_2.$$

В общем случае потенциалы точек c и d различны из-за различных величин падения напряжения U_1 и U_2 . Если окажется, что $U_1 > U_2$, то это значит, что потенциал точки c меньше потенциала точки d :

$$\varphi_c < \varphi_d.$$

В соответствии с этим ток в диагонали, имеющей гальванометр, течет от точки d к точке c , и стрелка гальванометра, отклонившись от нулевого положения на некоторый угол, например, вправо, отметит присутствие тока в диагонали мостика. Если же $U_2 > U_1$, то потенциал точки d меньше потенциала точки c :

$$\varphi_d < \varphi_c.$$

В этом случае ток через гальванометр проходит от точки c к точке d , и стрелка гальванометра теперь отклонится влево от нуля, показывая этим присутствие тока в цепи гальванометра. Токи I_3 и I_x , проходящие через сопротивления r_3 и r_x мостика, сходятся в узловой точке b схемы:

$$I_3 + I_x = I,$$

и далее ток I течет к минус-зажиму источника электрической энергии.

Направление и величина тока I_r в цепи гальванометра зависят от разности потенциалов между точками c и d , а следовательно, и от величины сопротивлений плеч мостика.

Можно подобрать сопротивления плеч мостика так, что потенциалы точек c и d будут равны друг другу; тогда

$$\varphi_c - \varphi_d = 0,$$

и тока в цепи гальванометра не будет:

$$I_r = 0.$$

В этом случае должно быть выполнено требование

$$I_1 = I_x \text{ и } I_2 = I_3,$$

так как ток в цепи гальванометра отсутствует. Кроме того, должны быть соблюдены условия равенства падений напряжений

$$I_1 r_1 = I_2 r_2 \text{ и } I_x r_x = I_3 r_3.$$

Разделив последние два равенства одно на другое, получим

$$\frac{I_1 r_1}{I_x r_x} = \frac{I_2 r_2}{I_3 r_3}.$$

Но так как $I_1 = I_x$ и $I_2 = I_3$, то последнее равенство после упрощения принимает вид

$$\frac{r_1}{r_x} = \frac{r_2}{r_3},$$

откуда

$$r_1 r_3 = r_2 r_x, \quad (514)$$

т. е. условием равновесия в схеме мостика, или, иначе, отсутствия тока в гальванометре, является равенство произведений сопротивлений противоположных плеч мостика. Следовательно, пользуясь формулой (514), можно найти неизвестное сопротивление r_x , если все остальные сопротивления плеч мостика известны:

$$r_x = \frac{r_1}{r_2} r_3. \quad (515)$$

Отношение сопротивлений $\frac{r_1}{r_2}$ называется отношением балансных плеч мостика.

Следовательно, чтобы измерить сопротивление при помощи мостика, надо в схеме его подобрать известные сопротивления r_1 , r_2 и r_3 так, чтобы установилось равновесие в схеме мостика, и затем по этим сопротивлениям определить r_x по формуле (515).

По методу измерения сопротивлений мостики разделяются на две основные группы. В одной из них устанавливается постоянное отношение балансных плеч $\frac{r_1}{r_2}$, и равновесие в мостике достигается при помощи подбора сравнительного сопротивления r_3 .

В другой группе мостиков устанавливается постоянство сравнительного сопротивления, и равновесие в мостике достигается при помощи изменения отношения балансных плеч.

§ 185. ТИПЫ МОСТИКОВ

На рис. 407 показана схема магазинного мостика завода «Электроприбор».

Мостик имеет: три магазина сопротивлений, из которых сопротивления r_1 и r_2 — балансные плечи, а остальные сопротивления (единицы, десятки, сотни и тысячи омов) составляют сравнительное сопротивление; гальванометр с отметкой на шкале

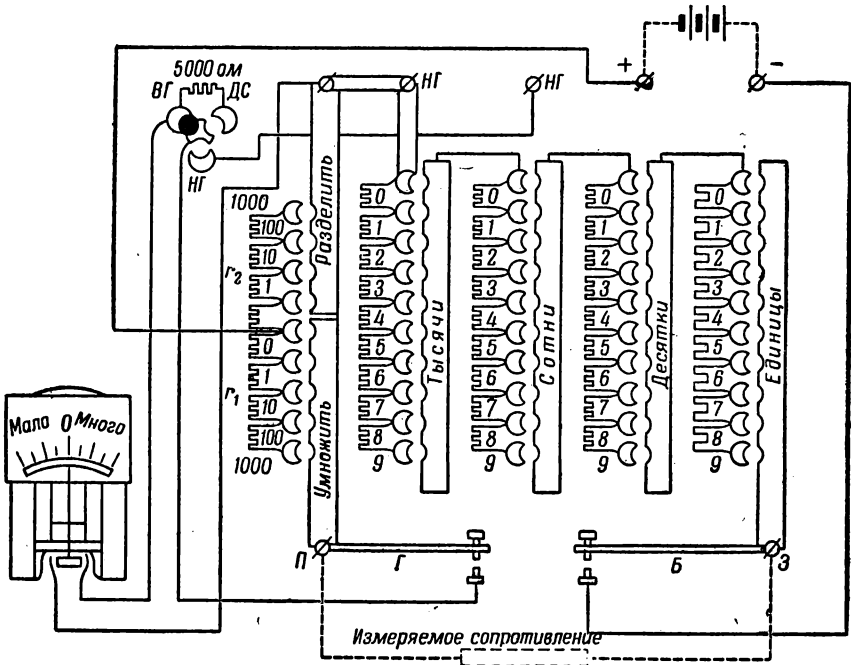


Рис. 407. Схема магазинного мостика завода «Электроприбор»

«Много» и «Мало» — магнитоэлектрической системы с двусторонней шкалой; коммутатор с гнездами ВГ, ДС, между которыми включено сопротивление 5000 ом, и гнездом НГ; два ключа, из которых ключ Б — для включения батареи и ключ Г — для замыкания цепи гальванометра; шесть зажимов: к зажимам П и З подключается искомое сопротивление, к зажимам (+) и (—) — источник электрической энергии постоянного тока, к зажимам НГ и НГ — наружный гальванометр в случае порчи гальванометра прибора.

На рис. 408 показан внешний вид мостика завода «Электроприбор».

Измерения мостиком завода «Электроприбор» в основном сводятся к следующему:

1. Батарею гальванических элементов присоединяют к зажимам (+) и (-). Напряжение питающей батареи и наиболее

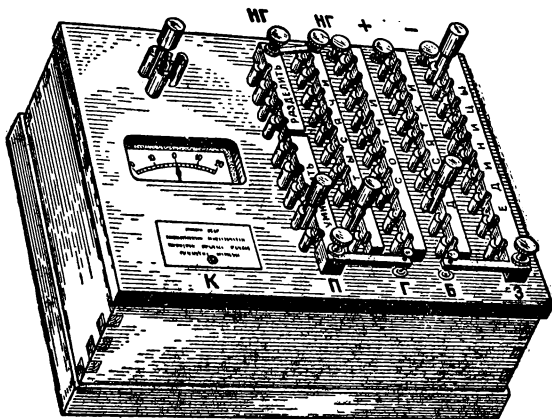


Рис. 408. Внешний вид мостика завода „Электроприбор“

выгодное соотношение балансных плеч мостика в зависимости от измеряемого сопротивления выбирают согласно данным, помещенным в табл. 44.

Таблица 44

Измеряемое сопротивление, <i>ом</i>	Наибольшее допустимое напряжение батареи, <i>в</i>	Вынутые штепсели на плечах мостика	
		умножить	разделить
0—10	2	1	1000
10—100	2	10	1000
100—1000	4	100	1000
1000—10 000	4	1000	1000
10 000—100 000	10	1000	100
100 000—1 000 000	10	1000	10
1 <i>Мом</i> — 10 <i>Мом</i>	20—40	1000	1

2. Измеряемое сопротивление подключают к зажимам *П* и *З* мостика.

3. Штепсель коммутатора, имеющего гнезда с отметкой *ВГ* (внутренний гальванометр), *ДС* (дополнительное сопротивление) и *НГ* (наружный гальванометр), вставляют в гнездо *ДС*, т. е. последовательно с внутренним сопротивлением гальвано-

метра вводят дополнительное сопротивление 5000 ом, предохраняющее гальванометр от чрезмерно большого тока.

4. В балансных плечах мостика «умножить» и «разделить» штепсели вставляют в гнезда 100 и 100, т. е. отношение балансных плеч берут равным единице, а в сравнительном сопротивлении устанавливают сопротивление такого же порядка, как и измеряемое.

5. Нажимают ключ *Б* и после этого на короткий промежуток времени — ключ *Г* (размыкать эти ключи следует в обратном порядке, т. е. сначала надо разомкнуть ключ *Г*, а затем ключ *Б*). Стрелка гальванометра, отклонившись вправо или влево, покажет на шкале отметку «Мало» или «Много»: первая означает, что сравнительное сопротивление мало и его надо увеличить, а вторая — что оно велико и его надо убавить. Подбирая сравнительное сопротивление, добиваются равновесия в мостике.

Если в начале измерения будет замечено, что стрелка гальванометра не установлена на нуль, то это следует сделать при помощи регулировочного винта, расположенного на крышке гальванометра.

6. Добившись равновесия в мостике, увеличивают его чувствительность, для чего выключают дополнительное сопротивление *ДС*, переставив штепсель из гнезда *ДС* в гнездо *ВГ*. Затем вновь устанавливают в мостике равновесие и окончательно определяют искомое сопротивление.

7. Если гальванометр мостика неисправен, то следует к зажимам *НГ* — *НГ* подключить какой-либо другой гальванометр. В этом случае переставляют штепсель из гнезда *ДС* в гнездо *НГ*, и после этого делают окончательное измерение методом, изложенным выше.

8. При работе с мостиком надо следить за тем, чтобы проводники мостика не перегревались от чрезмерно больших токов. Для этого нужно подбирать соответствующей величины напряжение питающей батареи и не допускать замыкания ключей *Б* и *Г* на длительное время.

На рис. 409 представлена схема универсального мостика УМВ с постоянным отношением балансных плеч, выпускаемого отечественной электропромышленностью.

Все три плеча мостика составлены из магазинов сопротивлений рычажного типа. Магазин сопротивлений I путем установления рычага на тот или иной контакт дает возможность установить некоторое постоянное отношение балансных плеч мостика в пределах от $\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{1000}$ до $\frac{R_1}{R_2} = \frac{100}{1}$. Сравнительное сопротивление R_3 состоит из четырех последовательно соединенных магазинов сопротивлений и может быть взято в пределах 1—9999 ом, меняясь ступенями через один ом. Неизвестное (измеряемое) сопротивление подключается к зажимам R_x .

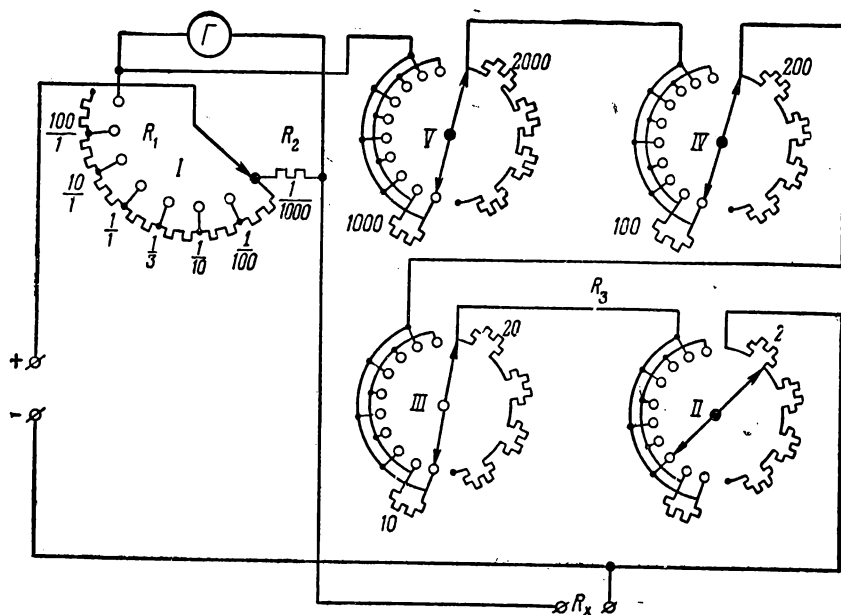


Рис. 409. Схема универсального мостика УМВ

Мостиком УМВ можно измерять сопротивления от 0,01 до 10^6 ом. Точность измерения не превышает $\pm 0,5\%$.

На рис. 410 приведена принципиальная схема линейного мостика. В нем балансные сопротивления r_1 и r_2 представляют собой сопротивления участков dc и bc калиброванной проволоки bd . Перемещая движок C вдоль калиброванной проволоки bd , изменяют длины ее отрезков dc и bc и этим изменяют соответственно

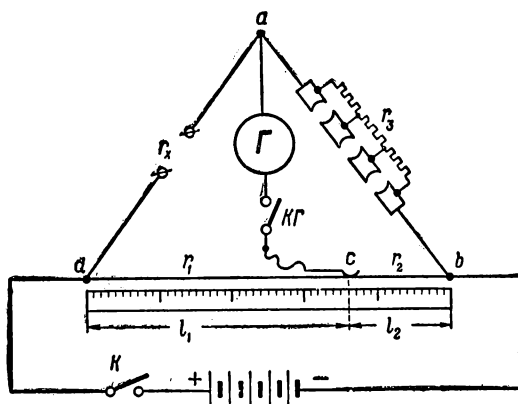


Рис. 410. Схема линейного мостика постоянного тока

балансные сопротивления r_1 и r_2 . Следовательно, линейный мостик относится к категории мостиков с переменным отношением балансных плеч. В качестве сравнительного сопротивления r_3 в нем применяется магазин сопротивлений.

Так как калиброванная проволока bd линейного мостика совершенно однородна по составу и имеет всюду одинаковое поперечное сечение, то отношение сопротивлений ее участков dc и bc численно равно отношению длин этих участков, т. е.

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{l_1}{l_2}.$$

где l_1 — длина участка dc калиброванной проволоки;
 l_2 — длина участка bc калиброванной проволоки.

В соответствии с этим в формуле для равновесия мостика можно отношение сопротивлений балансных плеч мостика $\frac{r_1}{r_2}$ заменить отношением соответствующих длин $\frac{l_1}{l_2}$ калиброванной проволоки.

Следовательно, формулу для определения неизвестного сопротивления r_x можно представить в следующем виде:

$$r_x = \frac{l_1}{l_2} r_3. \quad (516)$$

Для измерения индуктивностей и емкостей применяются мосты переменного тока. Мы здесь не можем останавливаться на их теории, которая подробно рассматривается в специальной литературе по электрическим измерениям. Ограничимся несколькими общими замечаниями.

Как известно, основным условием равновесия мостика постоянного тока является равенство произведений сопротивлений его противоположных плеч. Равновесия такого мостика можно достигнуть изменением сопротивления одного плеча, например сравнительного сопротивления, при постоянстве отношения балансных плеч. В противоположность этому **равновесие в мостике переменного тока при измерении индуктивности или емкости достигается изменением не менее двух его параметров**, например активного сопротивления и одновременно с этим индуктивности или емкости.

Условие равновесия в мостике переменного тока выражается системой двух независимых уравнений

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4, \quad (517)$$

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4. \quad (518)$$

Уравнение (517) показывает, что для равновесия мостика переменного тока необходимо равенство произведений численных значений полных сопротивлений противоположных плеч мостика.

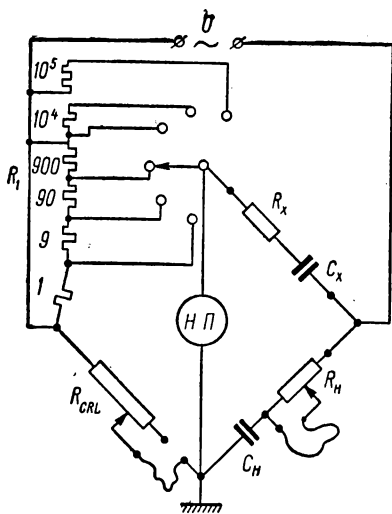


Рис. 411. Схема мостика УМ-2 для измерения емкости

шего подбора индуктивностей или емкостей можно добиться равенства

$$\varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4.$$

На рис. 411 представлена схема для измерения емкости с помощью универсального мостика переменного тока типа УМ-2, выпускаемого заводом «Эталон». Здесь первое плечо состоит из активного сопротивления R_1 , которое может быть взято равным 1; 10; 100; 1000; 10 000; 100 000 *ом*. Второе плечо представляет собой плавно изменяющееся переменное сопротивление R_{CRL} (индексы *CRL* показывают, что это сопротивление используется для измерения не только емкости, но и активного сопротивления и индуктивности). Третье плечо мостика состоит из последовательно соединенных образцовой (точно выверенной) емкости C_n и образцового сопротивления R_n . Четвертое плечо надо понимать как эквивалентную схему конденсатора с идеальной емкостью C_x и последовательно соединенным активным сопротивлением R_x , обуславливающим мощность потерь в диэлектрике конденсатора.

Порядок измерения емкости мостика типа УМ-2 следующий. Вначале устанавливают образцовое активное сопротивление R_n в третьем плече мостика равным нулю ($R_n = 0$) и изменяют отношение балансных плеч $\frac{R_1}{R_{CRL}}$ мостика, добиваясь наименьшего показания нулевого прибора *НП*. После этого приступают к регулировке сопротивления R_n , добиваясь дальнейшего уменьшения

Уравнение (518) показывает, что для равновесия мостика переменного тока необходимо равенство сумм углов сдвига фаз между соответствующими токами и напряжениями противоположных плеч мостика.

Из уравнения (518) можно сделать вывод, что если первое и третье плечи мостика являются участками цепи емкостного характера, т. е. $\varphi_1 < 0$ и $\varphi_3 < 0$, а второе и четвертое плечи — участками индуктивного характера, т. е. $\varphi_2 > 0$ и $\varphi_4 > 0$, то равновесия в мостике достигнуть нельзя. Если же первое и второе плечи — индуктивного характера, т. е. $\varphi_1 > 0$ и $\varphi_2 > 0$, а третье и четвертое — емкостного, т. е. $\varphi_3 < 0$ и $\varphi_4 < 0$, то путем соответствующего

показания нулевого прибора. Затем вновь переходят к регулировке отношения сопротивлений балансных плеч мостика $\left(\frac{R_1}{R_{CRL}}\right)$, потом опять к регулировке сопротивления R_n и т. д. Регулировка заканчивается тогда, когда ток в нулевом приборе окажется равным нулю, что будет свидетельствовать о наступлении момента равновесия в мостике.

В данном частном случае, когда сопротивления первого и второго плеч мостика — чисто активные, уравнения мостика принимают более простой вид:

$$R_x R_{CRL} = R_1 R_n;$$

$$R_{CRL} C_n = R_1 C_x.$$

Отсюда находим, что

$$R_x = \frac{R_1}{R_{CRL}} R_n; \quad (519)$$

$$C_x = \frac{R_{CRL}}{R_1} C_n. \quad (520)$$

Мостиком УМ-2 можно измерять емкости от 10 *нф* до 100 *мкф*. Наименьшая погрешность измерения при определении емкости составляет примерно 1%.

Мостик УМ-2 дает возможность измерять и индуктивности от 10 *мкгн* до 100 *гн*. При этом наименьшая погрешность измерения составляет 1 ÷ 2%.

§ 186. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Электродинамические ваттметры пригодны для измерения мощности в цепях постоянного и переменного тока.

Как было выяснено ранее, электродинамический ваттметр основан на принципе взаимодействия неподвижной и подвижной катушек. Первая из них соединена последовательно с потребителем, и по ней проходит весь ток нагрузки. Вторая катушка присоединена к потребителю параллельно, и по ней проходит ток, пропорциональный напряжению, приложенному к потребителю. Здесь можно различать два варианта подключения концов подвижной

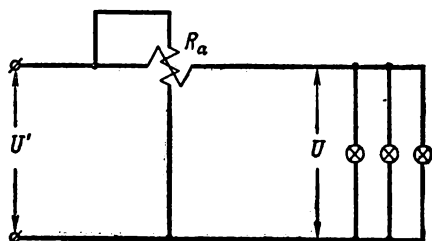


Рис. 412. Схема измерения мощности электродинамическим ваттметром

катушки по отношению к концам неподвижной катушки. Если подвижная катушка включена по схеме, приведенной на рис. 412, то

$$U' = U + IR_a,$$

где U' — напряжение на концах подвижной катушки;
 U — напряжение на потребителе;
 IR_a — падение напряжения в неподвижной катушке;
 R_a — сопротивление неподвижной катушки.

Мощность, которую зафиксирует ваттметр при заданной схеме включения подвижной катушки, определится формулой

$$P' = (U + IR_a)I = UI + I^2R_a = P + I^2R_a,$$

где P' — мощность, зафиксированная ваттметром;
 P — мощность, расходуемая в потребителе;
 I^2R_a — мощность, расходуемая в неподвижной катушке.

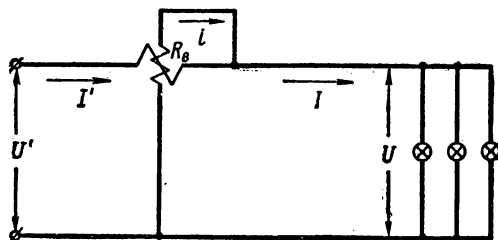


Рис. 413. Схема измерения мощности электродинамическим ваттметром

Следовательно, истинная мощность P , развиваемая током в потребителе, меньше мощности P' , зафиксированной ваттметром, на величину мощности, расходуемой в неподвижной катушке:

$$P = P' - I^2R_a. \quad (521)$$

В схеме, изображенной на рис. 413, один из концов подвижной катушки присоединен за неподвижной катушкой. В этом случае напряжение на концах подвижной катушки равно напряжению на зажимах потребителя. Ток I в потребителе меньше тока в неподвижной катушке на величину тока i , протекающего через подвижную катушку, т. е.

$$I = I' - i,$$

где I' — ток в неподвижной катушке;
 I — ток в потребителе.

Мощность, которую зафиксирует ваттметр в этом случае, определяется формулой

$$P'' = U(I + i) = UI + Ui = P + \frac{U^2}{R_B},$$

где P'' — мощность, зафиксированная ваттметром;
 P — истинная мощность, расходуемая в потребителе;
 $\frac{U^2}{R_B}$ — мощность, расходуемая в подвижной катушке;
 R_B — сопротивление подвижной катушки.

Следовательно, истинная мощность P , развиваемая током в потребителе, меньше мощности P'' , зафиксированной ваттметром, на величину мощности, расходуемой в подвижной катушке:

$$P = P'' - \frac{U^2}{R_B}. \quad (522)$$

При точных измерениях мощности необходимо иметь в виду потери мощности в катушках ваттметра и, зная заранее сопротивление катушек, подсчитать эти потери и внести поправки в показания ваттметра. Когда не требуется большая точность измерений мощности, показания ваттметра принимают за величину измеряемой мощности.

В ваттметрах обычно последовательно с подвижной катушкой подключается добавочное сопротивление r_d . В этом случае при определении мощности, расходуемой в подвижной катушке, надо учесть и это добавочное сопротивление.

У некоторых электродинамических ваттметров один из зажимов неподвижной и один из зажимов подвижной обмоток помечены звездочками. В этом случае для правильного включения ваттметра в цепь указанные зажимы соединяют друг с другом коротким, малого сопротивления проводом. Эти зажимы обычно называют генераторными, так как к ним непосредственно присоединяется провод, идущий от одного из зажимов сети (генератора электрической энергии).

При неправильном включении неподвижной и подвижной обмоток ваттметра в цепь стрелка прибора может отклоняться влево от нулевого деления. В этом случае концы подвижной обмотки ваттметра надо переключить.

§ 187. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Для непосредственного измерения электрической энергии, расходуемой в потребителе, применяются счетчики электрической энергии.

Ранее мы выяснили, что показания счетчиков как электродинамической, так и индукционной систем пропорциональны числам оборотов их подвижных частей (якорь, диск):

$$W = Cn,$$

где W — энергия, зарегистрированная счетчиком;
 n — число оборотов, совершенное подвижной частью счетчика;
 C — постоянная счетчика — энергия, соответствующая одному обороту подвижной части счетчика.

Для определения постоянной счетчика собирают схему, изображенную на рис. 414.

Сняв показание U вольтметра, I амперметра, подсчитывают число оборотов счетчика n за некоторое время t секунд и затем определяют постоянную счетчика по формуле

$$C = \frac{UIt}{3600000n} \frac{\text{квт-ч}}{\text{оборот}}, \quad (523)$$

где C — постоянная счетчика в киловатт-часах на один оборот;
 U — напряжение в вольтах;
 I — ток в амперах;
 t — время в секундах;
 n — число оборотов за время t секунд.

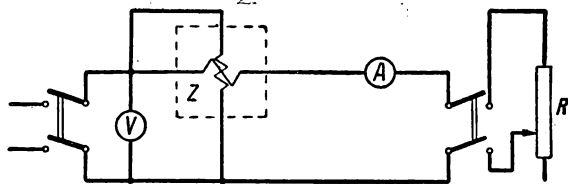


Рис. 414. Схема определения постоянной счетчика электрической энергии

Обычно постоянную счетчика определяют как среднее арифметическое из постоянных для 10, 25, 50 и 100% номинальной нагрузки счетчика.

В цепях постоянного тока измерение электрической энергии осуществляется при помощи счетчиков электродинамической системы.

В однофазных цепях переменного тока измерение электрической энергии, помимо счетчиков электродинамической системы, осуществляется при помощи счетчиков индукционной системы, описание которых было приведено выше.

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ
ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ

ГЛАВА XXXII
АККУМУЛЯТОРЫ

§ 188. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АККУМУЛЯТОРОВ

Работа всякого химического источника электрической энергии связана с прохождением электрического тока через электролит, являющийся одной из важнейших составных частей каждого из этих источников. Поэтому прежде чем рассматривать работу аккумуляторов и гальванических элементов, ознакомимся с химическим действием тока.

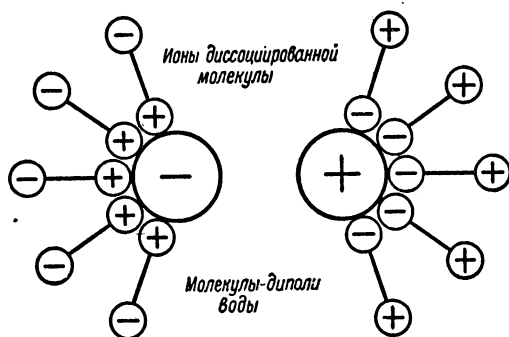


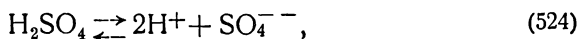
Рис. 415. Электролитическая диссоциация молекулы

Во всяком растворе солей, кислот и оснований (в электролите) происходит непрерывный процесс **электролитической диссоциации**. Сущность его заключается в том, что молекулы-диполи воды (растворителя) электрически воздействуют на молекулы-диполи растворенного вещества и заставляют их распадаться на положительные и отрицательные ионы (рис. 415).

При электролитической диссоциации молекул сложных веществ металлы и водород, как правило, выпадают в виде поло-

жительных ионов (катионов). Остальная же часть молекул становится при этом отрицательным ионом (анионом).

В частности, кислоты распадаются на положительные ионы водорода и отрицательные ионы кислотных остатков. Например, молекула серной кислоты распадается согласно следующему уравнению:

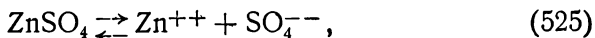


где H_2SO_4 — молекула серной кислоты;

2H^+ — два положительных однозарядных иона водорода;

SO_4^{--} — отрицательный двухзарядный ион кислотного остатка.

Соли распадаются на положительные ионы металла и отрицательные ионы кислотного остатка. Например, молекула цинкового купороса распадается согласно уравнению

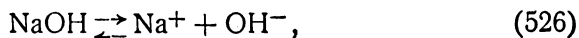


где ZnSO_4 — молекула цинкового купороса;

Zn^{++} — положительный двухзарядный ион цинка;

SO_4^{--} — отрицательный двухзарядный ион кислотного остатка.

Основания распадаются на положительные ионы металлов и отрицательные ионы гидроксила. Например, молекула едкого натрия распадается согласно уравнению



где NaOH — молекула едкого натрия;

Na^+ — положительный однозарядный ион натрия;

OH^- — отрицательный однозарядный ион гидроксила.

Аналогично распадается и молекула едкого калия:



где KOH — молекула едкого калия;

K^+ — положительный однозарядный ион калия;

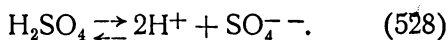
OH^- — отрицательный однозарядный ион гидроксила.

Знаки \rightleftharpoons во всех вышеприведенных формулах указывают, что электролитическая диссоциация — процесс обратимый, т. е. молекула сложного вещества не только распадается, но и образуется вновь из совокупности равноименных ионов.

Допустим, что в слабый раствор серной кислоты (в электролит) погружены два одинаковых электрода, например две пла-

тиновые пластинки. Один из них, называемый анодом, соединим с положительным полюсом источника электрической энергии, а другой, называемый катодом, соединим с отрицательным полюсом (рис. 416). В результате этого в цепи возникает электрический ток, который внутри электролита будет ионным. Рассмотрим, в чем заключается физическая сущность этого тока и каково его химическое действие.

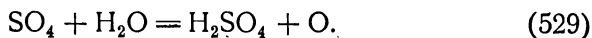
Независимо от того, существует ли в данном электролите ток или нет, в нем происходит непрерывный процесс электролитической диссоциации:



Под действием сил электрического поля, имеющегося в пространстве между электродами, положительные ионы водорода 2H^+ перемещаются в направлении действия сил поля, т. е. от положительно заряженного электрода (анода) к отрицательно заряженному (катоде). Наоборот, отрицательные ионы кислотного остатка SO_4^{--} перемещаются навстречу электрическому полю, т. е. от катода к аноду. Таким образом, явление электрического тока в рассматриваемом электролите выражается в форме перемещения потоков разноименных ионов, движущихся в диаметрально противоположных направлениях.

Положительные ионы водорода 2H^+ , войдя в соприкосновение с катодом, отнимают от него электроны и, нейтрализовавшись, осаждаются на нем в виде нейтральных молекул водорода.

Отрицательные ионы кислотного остатка SO_4^{--} , войдя в соприкосновение с анодом, отдают ему свой избыток электронов, превращаясь в нейтральную молекулу SO_4 . Однако последняя не может существовать в свободном состоянии и немедленно вступает в химическое взаимодействие с молекулой воды H_2O , в результате чего образуется молекула серной кислоты H_2SO_4 и освобождается электронейтральный атом кислорода:



Выделяющиеся атомы кислорода соединяются, образуя молекулы кислорода O_2 , которые осаждаются на аноде.

Таким образом, в результате прохождения электрического тока через раствор серной кислоты на аноде выделился кислород, а на катоде — водород. Так как они не вступают в химическое взаимодействие с платиновыми электродами, то они осажда-

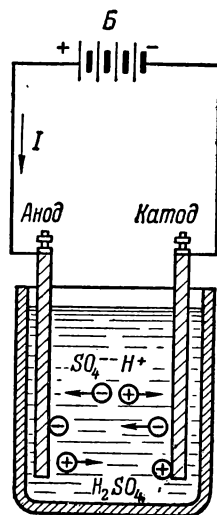


Рис. 416. Ионный ток в электролите

ются на электродах в виде пузырьков газа водорода и кислорода.

Явление выделения на электродах химических веществ при прохождении электрического тока через электролит называется электролизом.

Количество химических веществ, отлагающихся на электродах при электролизе, определяется законом Фарадея: количество веществ, отлагающихся на электродах, прямо пропорционально количеству электричества, прошедшего через электролит.

Закон Фарадея математически определяется следующей формулой:

$$Q = Kit, \quad (530)$$

где Q — количество вещества, отложившегося на электроде, в миллиграммах;

I — ток в амперах;

t — время в секундах;

K — коэффициент пропорциональности, называемый электрохимическим эквивалентом.

Электрохимическим эквивалентом вещества называют количество вещества (в миллиграммах), которое выделяется на электроде при прохождении через электролит электрического заряда, равного одному кулону.

В табл. 45 приведены электрохимические эквиваленты некоторых наиболее употребительных веществ.

Т а б л и ц а 45

Наименование вещества	Электрохимический эквивалент	Наименование вещества	Электрохимический эквивалент
Водород	0,0104	Медь	0,329
Кислород	0,083	Цинк	0,338
Железо	0,291	Свинец	1,072
Никель	0,309	Серебро	0,118

Пример 208. Определить, какое количество меди выделится из раствора медного купороса при прохождении через него тока $I = 8$ а в течение $t = 20$ мин., если электрохимический эквивалент меди $K = 0,329$.

Решение. По формуле (530) находим

$$Q = Kit = 0,329 \cdot 8 \cdot 20 \cdot 60 = 3158,4 \text{ мг} = 3,1584 \text{ г.}$$

Явление электролиза широко применяется на практике для получения чистых металлов из растворов их солей, например, получения химически чистой меди (электролитической меди) из раствора медного купороса, серебра — из раствора азотно-серебряной соли (AgNO_3) и т. д., а также для покрытия металлических предметов слоем металла (гальваностегия).

Если, например, в водный раствор никелевой соли погрузить в качестве анода никелевую пластинку, а в качестве катода какой-нибудь металлический предмет, например, ложку, чайник и т. п., то в процессе электролиза на этом металлическом предмете (на катоде) будет осаждаться слой никеля. Спустя несколько минут после начала опыта он покроется тонким слоем никеля, т. е. будет никелирован. Анод (никелевая пластинка) в процессе никелирования будет постепенно растворяться. Подобным же образом происходит процесс серебрения металлических предметов. Электролитом здесь служит раствор какой-нибудь серебряной соли, например AgNO_3 (азотнокислое серебро), а анодом — серебряная пластинка. При помощи электролиза можно также легко осуществить золочение, омеднение, хромирование металлических предметов.

Явление электролиза широко используется при рафинировании (очистке) металлов и гальванопластике, т. е. снятии точных копий с различных предметов, например с медалей, монет, статуэток и т. д.

Приоритет открытия гальванопластики принадлежит известному русскому ученому Б. С. Якоби.

В предисловии к своей книге о применении гальванопластики он писал: «Гальванопластика принадлежит исключительно России. Здесь она открыта, здесь и развивалась».

Б. С. Якоби был одним из тех русских ученых, которые на заре развития русской электротехники способствовали тому, что она во многих своих областях занимала ведущее место среди научных достижений в России и за границей. Помимо открытия гальванопластики, Б. С. Якоби изобрел электродвигатель и применил его на практике, построил первый пишущий и буквопечатающий телеграфные аппараты и разработал ряд других научных и технических проблем.

Итак, в процессе прохождения тока через рассматриваемый электролит (раствор серной кислоты) на электродах выделились разнородные вещества: на аноде — кислород, а на катоде — водород. Но, как показывает опыт, электрохимическая система, состоящая из кислорода, раствора серной кислоты и водорода



представляет собой гальваническую пару, способную преобразовать свою химическую энергию в электрическую. Если отсоединить от электродов этой гальванической пары источник электрической энергии, то обнаружим разность потенциалов между ними. При этом анод (электрод, покрытый водородом) будет иметь положительный потенциал, а катод (электрод, покрытый кислородом) — отрицательный. В электролите же между анодом и катодом образуется электрическое поле.

Явление изменения потенциалов электродов в результате отложения на них веществ при электролизе носит название поляризации электродов.

Электродвижущая сила, возникшая в результате поляризации электродов, называется **поляризационной электродвижущей силой**. Она численно равна разности потенциалов между анодом и катодом при разомкнутой внешней цепи.

Если поляризованные электроды замкнуть внешним проводником, то под влиянием поляризационной электродвижущей силы в цепи появится ток. Однако направление его в электролите будет противоположным тому, которое наблюдалось, когда в цепи действовал посторонний источник постоянного тока. Это приведет к тому, что на аноде, покрытом кислородом, теперь будет выделяться водород, а на катоде, покрытом водородом, — кислород. Кислород, соединяясь химически с водородом, будет образовывать как на аноде, так и на катоде молекулы воды. Электрический ток в цепи будет проходить до тех пор, пока не израсходуются активные вещества на электродах — кислород и водород.

Если бы мы пожелали возобновить работу данной электрохимической системы, то необходимо было бы вновь подключить электроды к источнику постоянного тока, путем электролиза отложить на них активные вещества (кислород и водород), затем разрядить систему на внешнее сопротивление и т. д. Таким образом, в рассматриваемой электрохимической системе можно осуществить ряд обратимых электрохимических процессов. При подключении ее к источнику постоянного тока в ней происходит преобразование электрической энергии в химическую энергию активных веществ, отлагающихся на электродах; наоборот, при замыкании этой системы на внешнее сопротивление (на потребитель) происходит преобразование химической энергии активных веществ в электрическую.

Рассмотренная нами электрохимическая система является простейшим электрическим **аккумулятором**, т. е. электрохимической системой, способной **накапливать (аккумулировать) химическую энергию за счет электрической и вновь преобразовывать ее в электрическую, отдавая ее потребителю.**

Количество электричества, измеряемое обычно ампер-часами, которое может отдать аккумулятор при своем нормальном разряде, называется емкостью аккумулятора. Емкость аккумулятора зависит от его конструкции и от продолжительности времени его разряда. Чем меньше разрядный ток, тем больше ампер-часов отдает аккумулятор.

Отдачей аккумулятора по количеству электричества называется отношение числа ампер-часов, полученных от аккумулятора при разряде, к количеству электричества, затраченному при его заряде.

Отдачей аккумулятора по энергии, т. е. коэффициентом полезного действия его, называется отношение энергии, полученной от аккумулятора при его разряде, к энергии, затраченной при заряде.

Рассмотренный нами выше аккумулятор обладает весьма малыми емкостью, отдачей по количеству электричества и коэффициентом полезного действия, а поэтому практического значения не имеет. На практике обычно применяются аккумуляторы, у которых в процессе заряда образуется значительное количество активных веществ на электродах, т. е. имеется большая емкость. Такие аккумуляторы могут работать при относительно высоком коэффициенте полезного действия.

Применяемые в современной практике аккумуляторы подразделяются на две основные категории — щелочные и кислотные. В свою очередь щелочные аккумуляторы подразделяются на кадмиево-никелевые и железо-никелевые.

§ 189. ЩЕЛОЧНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

I. Кадмиево-никелевые аккумуляторы

1. Устройство аккумулятора. На рис. 417 приведен внешний вид кадмиево-никелевого аккумулятора, а на рис. 418 показано его внутреннее устройство. Сосуд аккумулятора 1 изготовлен из листовой стали. Внутри сосуда помещены положительные 2 и отрицательные 3 пластины, разделенные эбонитовыми изоляционными палочками 6. Боковая изоляция 5 предохраняет пластины от соприкосновения со стенками сосуда. Пробка 4 прикрывает отверстие в аккумуляторе, служащее для заливки его электролитом и для отвода газов.

В качестве электролита в кадмиево-никелевом аккумуляторе применяется водный раствор едкого калия КОН или едкого натрия NaOH. Для улучшения работы аккумулятора в электролит иногда добавляют едкого лития LiOH. Однако такой составной электролит несколько увеличивает внутреннее сопротивление аккумулятора и делает его менее холодостойким.

В табл. 46 приведены электролиты, применяемые в кадмиево-никелевых аккумуляторах, с указанием температурных условий их эксплуатации.

Положительные и отрицательные пластины кадмиево-никелевого аккумулятора одинаковы по своей конструкции (рис. 419). Они состоят из отдельных стальных никелированных рам, в которые заделаны в виде ячеек пакетики из перфорированной стали с активной массой.

В качестве активной массы положительных пластин применяется смесь из гидрата закиси никеля $Ni(OH)_2$, гидрата окиси никеля $Ni(OH)_3$ и некоторого количества графита (до 20%), увеличивающего электропроводимость массы.

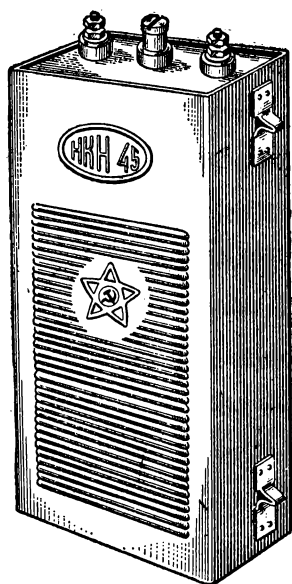


Рис. 417. Внешний вид щелочного аккумулятора

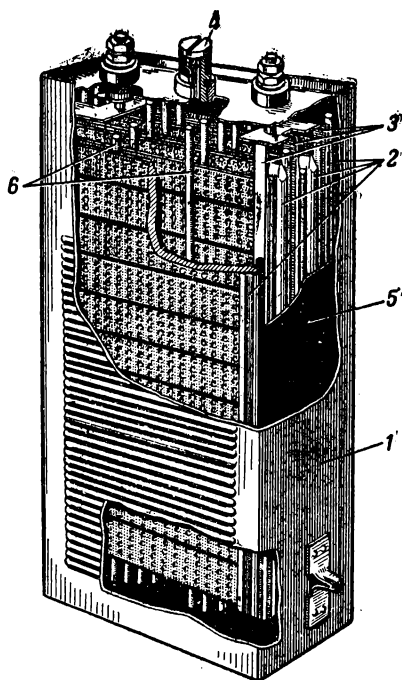


Рис. 418. Внутреннее устройство щелочного аккумулятора

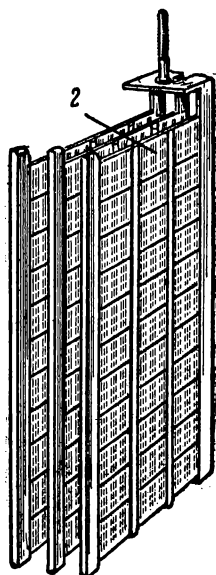
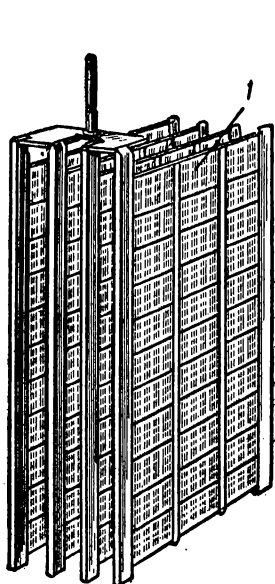


Рис. 419. Пластины щелочного аккумулятора

Электролиты, применяемые в кадмиево-никелевых аккумуляторах

Предельные температуры при эксплуатации	Электролит	Удельный вес электролита	Примечание
От -40 до -15° Ц	КОН	1,26—1,3	Зимний электролит
От -15 до +25° Ц	КОН	1,19—1,21	
От -15 до +40° Ц	КОН + LiОН	1,19—1,21	
От +15 до +35° Ц	NaОН	1,17—1,19	Летний электролит То же
От +40 до +60° Ц	NaОН + LiОН	1,17—1,19	

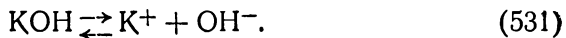
В качестве активной массы отрицательных пластин применяется смесь губчатого кадмия Cd с железом Fe (75 ÷ 80% кадмия и 25 ÷ 20% железа). Железо увеличивает электропроводимость массы и предохраняет ее от спекания.

2. Электрохимические процессы при разряде аккумулятора. Допустим, что кадмиево-никелевый аккумулятор заряжен. В этом случае он представляет собой следующую электрическую систему:



т. е. активным веществом анода (+) является гидрат окиси никеля $\text{Ni}(\text{OH})_3$, активной массой катода (-) — губчатый (пористый) кадмий Cd и электролитом — раствор едкого калия КОН.

В электролите аккумулятора происходит непрерывный процесс электролитической диссоциации молекул



Присоединим к зажимам аккумулятора внешнее сопротивление (потребитель). В цепи возникнет электрический ток, и аккумулятор начнет разряжаться.

На рис. 420 показана принципиальная схема разряда кадмиево-никелевого аккумулятора.

Положительные ионы калия K^+ перемещаются в направлении электрического поля, т. е. от отрицательного электрода (катода) к положительному (аноду). Отрицательные ионы гидроксила OH^- перемещаются навстречу электрическому полю, т. е. от анода к катоду.

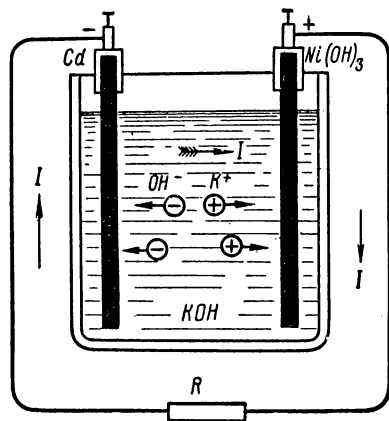
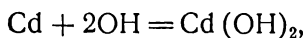


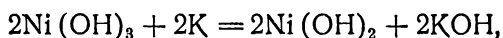
Рис. 420. Принципиальная схема разряда кадмиево-никелевого аккумулятора

Процесс на отрицательном электроде. С отрицательного электрода (катода) электроны уходят во внешнюю цепь. Отрицательные ионы гидроксидов OH^- отдают свои отрицательные заряды катоду, и в результате этого там возникает химическая реакция, которую в молекулярном виде запишем так:



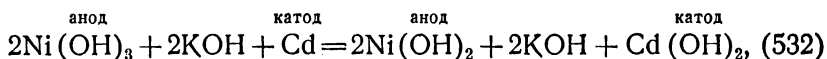
т. е. кадмий Cd , соединяясь химически с гидроксидом 2OH , образует совместно с ним гидрат окиси кадмия $\text{Cd}(\text{OH})_2$.

Процесс на положительном электроде. Из внешней цепи на анод поступают свободные электроны, а из электролита — положительные ионы калия K^+ , которые отдают аноду свои положительные заряды. В результате этого на аноде возникает химическая реакция, которую в молекулярном виде запишем так:



т. е. при разряде аккумулятора на аноде расходуется гидрат окиси никеля $2\text{Ni}(\text{OH})_3$, а также калий 2K и одновременно с этим образуются гидрат закиси никеля $2\text{Ni}(\text{OH})_2$ и едкий калий 2KOH .

Следовательно, уравнение токообразующего процесса при разряде кадмиево-никелевого аккумулятора можно записать в молекулярном виде так:



т. е. в результате разряда кадмиево-никелевого аккумулятора активная масса его отрицательного электрода — кадмий — преобразуется в гидрат окиси кадмия $\text{Cd}(\text{OH})_2$, а активная масса положительного электрода — гидрат окиси никеля $\text{Ni}(\text{OH})_3$ — в гидрат закиси никеля.

Концентрация электролита — едкого калия KOH — при разряде аккумулятора не изменяется, так как сколько едкого калия расходуется вблизи катода, столько же его возникает вблизи анода.

3. Электрохимические процессы при заряде аккумулятора. При заряде аккумулятора его анод присоединяется к положительному полюсу источника электрической энергии, а катод — к отрицательному полюсу.

В начале заряда аккумулятор представляет собой электрохимическую систему следующего состава:



При подключении аккумулятора к источнику постоянного тока в цепи возникает электрический ток. Теперь положительные ионы

калия K^+ направляются внутри аккумулятора от анода к катоду, а отрицательные ионы гидроксила OH^- — от катода к аноду.

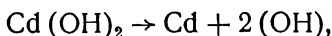
На рис. 421 показана принципиальная схема заряда кадмиево-никелевого аккумулятора.

Процесс на положительном электроде. Свободные электроны уходят с анода, и одновременно с этим отрицательные ионы гидроксила OH^- попадают на анод и отдают ему свои отрицательные заряды. В результате на аноде возникает химическая реакция, которая в молекулярном виде может быть записана так:



т. е. гидрат закиси никеля $2Ni(OH)_2$, соединяясь с гидроксидом $2(OH)$, совместно образует гидрат окиси никеля $2Ni(OH)_3$.

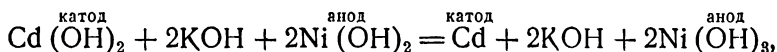
Процесс на отрицательном электроде. Свободные электроны поступают от источника электрической энергии на отрицательный электрод, в результате чего там возникает химическая реакция, которую в молекулярном виде можно записать так:



т. е. гидрат окиси кадмия $Cd(OH)_2$ в результате химической реакции распадается на губчатый кадмий Cd и гидроксил $2(OH)$. Последний же, вступая в химическое взаимодействие с калием, образует молекулы едкого калия:



Следовательно, уравнение токообразующего процесса при заряде кадмиево-никелевого аккумулятора можно записать в молекулярном виде следующим образом:



т. е. в результате заряда кадмиево-никелевого аккумулятора на его катоде восстанавливается губчатый кадмий Cd , а на аноде — гидрат окиси никеля $2Ni(OH)_3$.

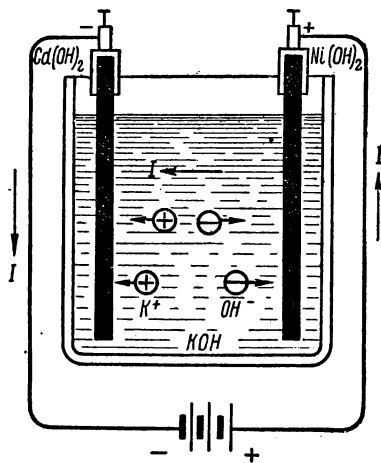
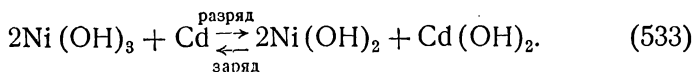


Рис. 421. Принципиальная схема заряда кадмиево-никелевого аккумулятора

Концентрация раствора едкого калия КОН сохраняется неизменной по тем же причинам, что и при разряде аккумулятора.

Таким образом, заряд и разряд кадмиево-никелевого аккумулятора — обратимая электрохимическая реакция, которую можно записать в молекулярном виде следующим образом:



4. Напряжение при заряде и разряде аккумулятора. На рис. 422 приведены кривые изменения напряжения при заряде и

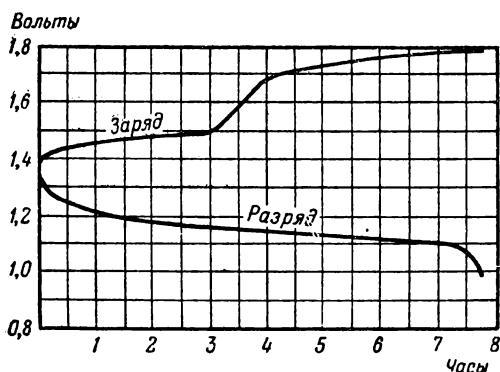


Рис. 422. Кривые изменения напряжения кадмиево-никелевого аккумулятора при его заряде и разряде

разряде кадмиево-никелевого аккумулятора. При заряде напряжение на зажимах такого аккумулятора вначале быстро растет, достигая 1,4 в. Затем в течение нескольких часов оно относительно медленно поднимается до 1,5 в. После этого оно вновь относительно быстро достигает 1,65 в и, наконец, относительно медленно растет до 1,75—1,8 в.

После того как аккумулятор будет заряжен и отключен от источника электрической энергии, напряжение на его зажимах упадет с 1,8 до 1,5 в.

При установке аккумулятора на разряд напряжение его вначале относительно быстро падает, достигая 1,3 в, а затем уже медленно и равномерно понижается до 1,1 в. Если продолжить разряд аккумулятора дальше, то его напряжение будет уменьшаться, круто падая вниз.

Среднее разрядное напряжение кадмиево-никелевого аккумулятора принимается равным 1,25 в.

5. Внутреннее сопротивление аккумулятора. Внутреннее сопротивление кадмиево-никелевого аккумулятора относительно мало и практически измеряется сотыми или тысячными долями ома.

По мере разряда аккумулятора его внутреннее сопротивление растет.

Величину внутреннего сопротивления кадмиево-никелевого аккумулятора можно практически определить по следующей эмпирической формуле:

$$r_0 = \frac{0,3}{Q}, \quad (534)$$

где r_0 — внутреннее сопротивление аккумулятора в омах;
 Q — емкость аккумулятора в ампер-часах.

6. Отдача аккумулятора по емкости и по энергии. Отдача кадмиево-никелевого аккумулятора по его емкости (количеству электричества) колеблется в пределах 65—70%.

Несколько ниже отдача аккумулятора по энергии. Она колеблется в пределах 50—55%, так как потеря энергии сильно зависит от разного рода необратимых процессов, например в электролите и на электродах.

Если разряд аккумулятора вести предельным током, то в соответствии с этим отдача аккумулятора как по емкости, так и по энергии будет уменьшена из-за более интенсивных химических реакций.

7. Типы кадмиево-никелевых аккумуляторов, применяемых на практике. В настоящее время в СССР выпускаются самые разнообразные типы кадмиево-никелевых аккумуляторов.

В табл. 47 приведены типы кадмиево-никелевых аккумуляторов, изготовляемых в СССР, с указанием их электрических данных.

Таблица 47

Основные данные кадмиево-никелевых аккумуляторов

Тип аккумулятора	Номинальная емкость, а-ч	Номинальный зарядный ток, а	Номинальный разрядный ток, а	Вес, кг	
				без электролита	с электролитом
АКН-2,25	2,25	0,56	0,28	0,28	0,33
НКН-10	10	2,5	1,25	0,60	0,74
НКН-22	22	5,5	2,75	1,35	1,67
НКН-45	45	11,25	5,65	2,18	2,72
НКН-60	60	15,0	7,5	3,70	4,60
НКН-100	100	25,0	12,5	5,10	6,50

Примечание. Первая буква условного обозначения аккумулятора (элемента) указывает практическое назначение его, а именно: А — анодный (для питания анодных цепей в радиотехнике), Н — накальный (для питания цепей накала радиоламп). Вторая и третья буквы указывают тип аккумулятора: КН — кадмиево-никелевый. Число, стоящее правее букв, указывает емкость аккумулятора в ампер-часах. Следовательно, если аккумулятор имеет условное обозначение НКН-100, то это означает, что он накальный (Н), кадмиево-никелевый (КН) и имеет емкость 100 ампер-часов.

II. Железо-никелевые аккумуляторы

Наряду с кадмиево-никелевыми аккумуляторами в практике применяются и железо-никелевые аккумуляторы (ЖН).

По конструкции они мало отличаются от кадмиево-никелевых. В отличие от последних они имеют отрицательных пластин на одну больше, чем положительных. Это объясняется тем, что для

получения соответствующей емкости аккумулятора необходимо взять несколько большее количество активной массы отрицательных пластин. Обычно отрицательные пластины железо-никелевого аккумулятора соединены с корпусом, а вывод положительного электрода тщательно изолирован от корпуса.

В качестве электролита для железо-никелевых аккумуляторов применяется раствор едкого калия КОН или едкого натрия NaOH, в некоторых случаях с примесью едкого лития LiOH.

Положительные пластины железо-никелевых аккумуляторов такие же, как у кадмиево-никелевых аккумуляторов. Следовательно, активной массой их в основном является гидрат окиси никеля $Ni(OH)_2$.

Активная масса отрицательных пластин железо-никелевых аккумуляторов отличается от активной массы кадмиево-никелевых аккумуляторов. Она в основном состоит из смеси губчатого железа Fe с его окислами и небольшого количества процентов окиси ртути.

Внутреннее сопротивление железо-никелевых аккумуляторов несколько больше, чем кадмиево-никелевых, и практически может быть определено по эмпирической формуле

$$R_0 \approx \frac{0,45}{Q}, \quad (535)$$

где Q — емкость аккумулятора в ампер-часах;

R_0 — внутреннее сопротивление аккумулятора в омах.

Напряжение при разряде железо-никелевых аккумуляторов несколько ниже, чем у кадмиево-никелевых, из-за относительно большого внутреннего сопротивления, а напряжение при заряде выше. В конце заряда оно достигает примерно 1,8—1,9 в.

Емкость железо-никелевых аккумуляторов при увеличении разрядного тока изменяется относительно мало.

Отдача по количеству электричества равна примерно 65%, а по энергии — 45—50%. Железо-никелевые аккумуляторы обладают такими характеристиками, что во многих случаях практики могут вполне заменить кадмиево-никелевые аккумуляторы, например в пределах температур от $-10^\circ C$ до $+30^\circ C$.

В табл. 48 приведены основные данные железо-никелевых аккумуляторов, изготавливаемых нашей электропромышленностью.

Т а б л и ц а 48

Тип аккумулятора	Номинальная емкость, а-ч	Номинальный зарядный ток, а	Номинальный разрядный ток, а	Вес, кг	
				без электролита	с электролитом
ЖН-22	22	5,5	2,75	1,4	1,73
ЖН-45	45	11,25	5,65	2,4	2,85
ЖН-60	60	15,00	7,5	4,0	4,78
ЖН-100	100	25,00	12,5	5,6	6,80

Примечание. Буквы ЖН обозначают железо-никелевые. Число, стоящее после буквы ЖН, указывает емкость аккумулятора в ампер-часах.

Неисправности железо-никелевых аккумуляторов в основном те же, что и у кадмиево-никелевых. Правила ухода и эксплуатации также мало отличаются от правил для кадмиево-никелевых аккумуляторов.

На практике применяется много разнообразных типов железо-никелевых аккумуляторов, изготавливаемых электропромышленностью СССР. В частности, в технике связи используются аккумуляторы ЖН-22, ЖН-45, ЖН-60 и ЖН-100.

§ 190. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЩЕЛОЧНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

При составлении раствора электролита необходимо брать дистиллированную воду в количестве, потребном для получения заданной плотности электролита.

В табл. 49 указано, какое количество едкого калия содержится в одном литре электролита при заданной его плотности.

Т а б л и ц а 49

Содержание едкого калия в одном литре электролита при заданной его плотности

Плотность электролита	Содержание едкого калия на 1 л электролита, г	Плотность электролита	Содержание едкого калия на 1 л электролита, г
1,18	242	1,25	335
1,19	255	1,26	349
1,20	269	1,27	362
1,21	282	1,28	375
1,22	295	1,29	390
1,23	308	1,30	403
1,24	323		

В табл. 50 указано, какое количество едкого натрия необходимо взять на один литр дистиллированной воды, чтобы получить необходимую плотность электролита.

Т а б л и ц а 50

Содержание едкого натрия в одном литре электролита

Плотность электролита	Содержание едкого натрия на 1 л электролита, г
1,17	176,2
1,18	188,8
1,19	201,2

В табл. 51 указано, какое количество едкого натрия содержится в одном литре концентрированного раствора едкого натрия различных плотностей.

Т а б л и ц а 51

Содержание едкого натрия в его концентрированных растворах

Плотность концентрированного раствора	Содержание едкого натрия в 1 л концентрированного раствора, г	Плотность концентрированного раствора	Содержание едкого натрия в 1 л концентрированного раствора, г
1,241	267,4	1,383	484,1
1,252	281,7	1,397	507,9
1,263	296,8	1,410	530,9
1,274	311,9	1,424	556,2
1,285	327,7	1,438	582,0
1,297	344,7	1,453	610,6
1,308	361,7	1,468	639,8
1,320	380,6	1,483	669,7
1,332	399,6	1,498	700,0
1,345	419,6	1,514	732,9
1,357	441,0	1,530	766,5
1,370	462,1	—	—

Приготавливать электролиты для щелочных аккумуляторов рекомендуется в стеклянной или керамической посуде. Запрещается готовить раствор в медной, свинцовой, луженой посуде или посуде, содержащей остатки серной кислоты.

Аккумулятор можно заливать только остывшим электролитом, температура которого не превышает 25° Ц.

Уровень электролита в аккумуляторе должен быть выше верхних краев пластин аккумулятора-примерно на 10 мм. По мере расхода электролита в аккумуляторе надо своевременно доливать аккумулятор дистиллированной водой или слабым раствором едкого калия.

Запрещается держать аккумуляторы в помещениях, где имеются кислотные испарения, так как кислоты разрушают активную массу пластин.

Необходимо внимательно следить за чистотой электролита, так как при выпадении осадков на дно сосуда аккумулятора пластины его могут закоротиться, вследствие чего напряжение на его зажимах и емкость будут значительно снижены.

Слишком высокий уровень электролита в аккумуляторе и просачивание его через пробку или выводы приводит к обильному выделению ползучих солей. Поэтому надо периодически очищать аккумулятор от пыли и грязи, а металлические неокрашенные наружные части смазывать техническим вазелином.

Рекомендуется аккуратно обращаться с электролитом, не допуская попадания едкой щелочи на руки или одежду, а в случае

обнаружения этого следует смыть едкую щелочь 2% раствором борной кислоты, а затем промыть чистой водой.

Заряд аккумулятора производят от источника электрической энергии с постоянным напряжением или от сети переменного тока, но в последнем случае с обязательным использованием выпрямителя или преобразователя тока.

Перед началом заряда аккумулятора необходимо вынуть пробки из отверстий в его крышке, чтобы газы вышли из бака аккумулятора, а затем проверить уровень электролита в баке.

Заряжать аккумулятор необходимо нормальным током, указанным в паспорте аккумулятора. Величину нормального тока заряда аккумулятора можно определить по эмпирической формуле

$$I_{\text{зар}} = \frac{Q}{4}, \quad (536)$$

т. е. нормальный зарядный ток щелочного аккумулятора равен емкости аккумулятора, разделенной на 4.

Время нормального заряда аккумулятора — не менее 6 часов. При необходимости форсирования заряда это время можно сократить до 4 часов: первые 2,5 часа заряжать аккумулятор двойным нормальным током, а остальные 1,5 часа — нормальным током.

Заряд аккумулятора необходимо всякий раз доводить до конца, помня, что часто повторяющаяся недозарядка аккумулятора приводит к резкому снижению его емкости или даже порче его.

Когда напряжение на зажимах аккумулятора достигнет 1,8 в, следует его прoderжать под током еще минут 30, а затем снять с заряда.

О конце заряда аккумулятора следует судить по напряжению на его зажимах, но никоим образом не по так называемому «кипению» электролита.

Так как при заряде щелочного аккумулятора наблюдается обильное выделение газов — кислорода и водорода (результат разложения воды в электролите), то необходимо следить за тем, чтобы отверстия в пробках аккумулятора, предназначенные для выхода газов, не были засорены, иначе вследствие скопления газов внутри сосуда аккумулятора стенки его могут раздуться. Завинчивать пробки аккумулятора надо не раньше чем через 6 часов после окончания заряда, чтобы газы полностью улетучились из аккумулятора.

Разряжать аккумулятор следует током не выше нормального, обычно указываемого в паспорте аккумулятора. Практически можно считать, что нормальный разрядный ток щелочного аккумулятора не должен превышать половины нормального зарядного тока его:

$$I_{\text{разр}} = \frac{I_{\text{зар}}}{2} = \frac{Q}{8}. \quad (537)$$

Рекомендуется разряд щелочного аккумулятора закончить, когда напряжение на его зажимах упадет до 1,1 в. В крайних случаях, когда нельзя своевременно прекратить разряд аккумулятора, допускается разряд его до 0,8 в.

Как при заряде, так и при разряде щелочного аккумулятора необходимо следить за тем, чтобы электролит и активная масса пластин не перегрелись, так как это резко снижает емкость аккумулятора. Например, если температура электролита аккумулятора будет доведена до 45° Ц, то номинальная емкость аккумулятора уменьшится примерно на 50%.

Эксплуатация щелочного аккумулятора при низких температурах также ведет к резкому снижению емкости аккумулятора. В табл. 52 указано влияние низких температур на отдачу аккумулятора по емкости.

Т а б л и ц а 52

Отдача кадмиево-никелевых аккумуляторов по емкости при низких температурах

Температура, ° Ц	Отдача аккумулятора по емкости (в процентах)	
	для случая заряда при нормальной температуре и разряда при данной низкой температуре	для случая заряда и разряда при данной низкой температуре
—10	85	80
—20	75	70
—30	50 —÷ 60	45
—40	20 —÷ 30	5

Примечание. Нормальной температурой заряда аккумулятора считается 25° Ц.

§ 191. КИСЛОТНЫЕ (СВИНЦОВЫЕ) АККУМУЛЯТОРЫ

1. Устройство аккумуляторов. В качестве сосудов кислотных аккумуляторов применяют эбонитовые, стеклянные или деревянные, выложенные свинцом, баки. Аккумуляторы с эбонитовыми баками (рис. 423) используются главным образом в переносных установках, со стеклянными баками (рис. 424) — в переносных и стационарных установках и с деревянными баками — в мощных стационарных установках.

На рис. 423 показано внутреннее устройство кислотного аккумулятора в эбонитовом баке. Здесь знаком плюс (+) отмечены положительные электроды (пластины), знаком минус (—) — отрицательные. Деревянные и эбонитовые прокладки служат для изоляции пластин друг от друга. Пробка прикрывает отверстие, через которое заливают электролит в сосуд аккумулятора и выходят газы при работе аккумулятора.

Электролитом аккумулятора служит 24—33% раствор химически чистой серной кислоты.

Дополнительные пластины свинцовых аккумуляторов применяются трех видов: поверхностные, панцирные и намазные (решчатые).

Поверхностные положительные пластины представляют собой отлитые из чистого свинца пластины ребристого строения, так

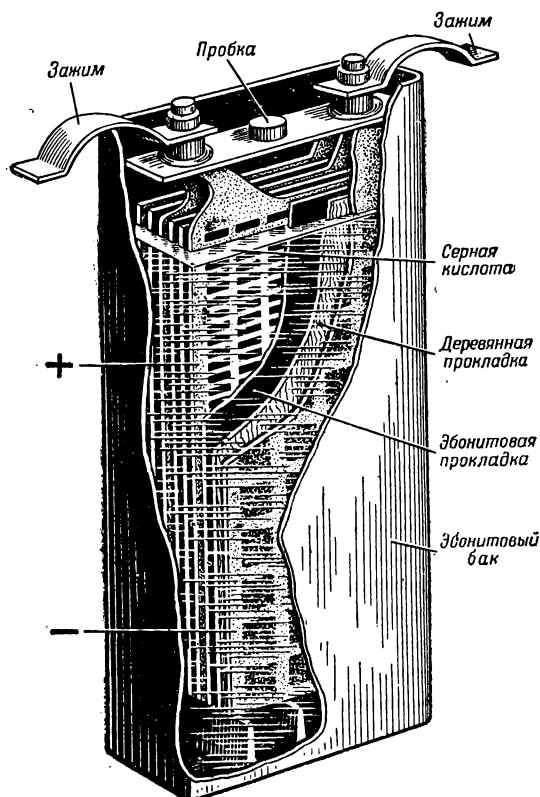


Рис. 423. Свинцовый аккумулятор переносный

что их активная поверхность относительно велика. Путем ряда повторных зарядов и разрядов добиваются того, что на всей активной поверхности пластин отлагается активная масса — перекись свинца PbO_2 толщиной в несколько долей миллиметра. Достоинство поверхностных пластин заключается в том, что они механически прочны, их активная масса не вываливается из борозд пластин. Недостатки их — малая удельная емкость (емкость аккумулятора на единицу веса пластин) и длительность формовки, связанная с относительно большим расходом электрической

энергии. На рис. 425 приведен образец одного из типов поверхностных пластин.

Панцирные пластины состоят из эбонитовых трубок с полукольцевыми прорезями, соединенных в одну общую пластину. Внутри трубок вложены стержни из свинцово-сурьмяного сплава. Электролит свободно проникает к активной массе в трубках через прорези, а сама активная масса прочно удерживается в трубках и не вываливается при механических толчках.

Панцирные пластины имеют значительно большую удельную емкость по сравнению с поверхностными.

Намазные (решетчатые) положительные пластины состоят из решетки, сделанной из свин-

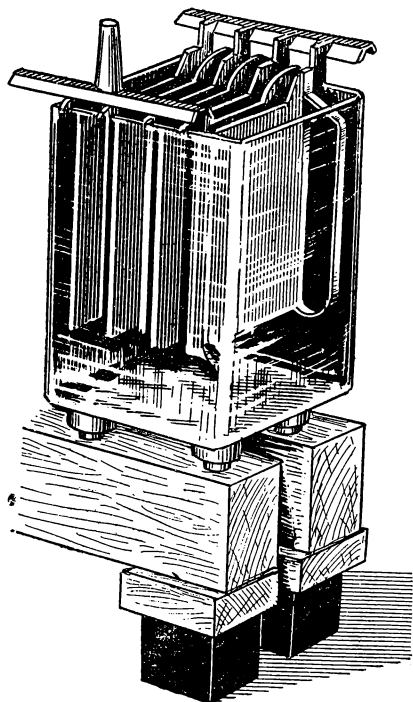


Рис. 424. Свинцовый аккумулятор стационарный

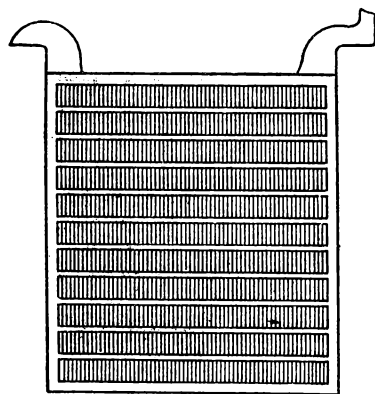


Рис. 425. Положительная пластина свинцового аккумулятора

цово-сурьмяного сплава. Ячейки этой решетки заполнены активной массой в виде пасты, сделанной из окислов свинца на растворе серной кислоты. Затвердевшая паста после просушки прочно удерживается в ячейках. Достоинство намазных (решетчатых) пластин заключается в том, что они дают относительно большую удельную емкость аккумулятора. Недостаток их — относительно малая механическая прочность, так как активная масса может вываливаться из ячеек при механических толчках или продолжительной эксплуатации аккумулятора.

Отрицательные пластины свинцовых аккумуляторов изготовляют двух типов: коробчатые и намазные.

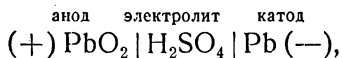
Коробчатые пластины представляют собой тонкую свинцовую коробку, состоящую из отдельных ячеек, внутрь которых вма-

зана активная масса (паста). На рис. 426 представлен внешний вид коробчатой пластины.

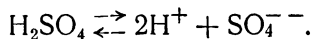
Намазные отрицательные пластины не отличаются по своей конструкции от намазных положительных пластин.

2. Электрохимические процессы при разряде аккумулятора.

Свежезаряженный кислотный аккумулятор представляет собой следующую электрохимическую систему:



т. е. положительный электрод (анод) имеет в качестве активной массы перекись свинца PbO_2 , отрицательный электрод — губчатый свинец Pb ; электролитом служит раствор серной кислоты H_2SO_4 . В электролите происходит обратимый процесс электролитической диссоциации молекулы



При подключении к аккумулятору приемника электрической энергии в цепи возникает электрический ток. Во внешней цепи это будет ток проводимости, осуществляемый свободными электронами, перемещающимися от отрицательного электрода (катода) по внешней цепи к аноду. Внутри аккумулятора это будет ионный ток, осуществляемый движением ионов. В частности, положительные ионы водорода H^+ будут перемещаться в направлении электрического поля, т. е. от отрицательного электрода (катода) к положительному (аноду). Отрицательные ионы кислотного остатка SO_4^{--} будут перемещаться навстречу электрическому полю, т. е. от анода к катоду.

На рис. 427 показана принципиальная схема разряда кислотного аккумулятора.

Процесс на положительном электроде. На положительный электрод при разряде аккумулятора поступают свободные электроны из внешней цепи и одновременно с этим положительные ионы водорода H^+ из электролита. В результате этого там в присутствии серной кислоты H_2SO_4 возникает химическая реакция, уравнение которой в молекулярном виде можно записать так:



т. е. на положительном электроде во время разряда конденсатора расходуется перекись свинца PbO_2 , водород 2H и серная

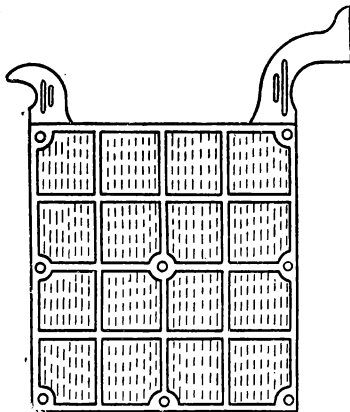
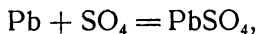


Рис. 426. Отрицательная пластина свинцового аккумулятора

кислота H_2SO_4 ; одновременно на ней образуется сернокислый свинец (сульфат $PbSO_4$), а в растворе у электрода выделяется вода H_2O .

Процесс на отрицательном электроде. Свободные электроны уходят с отрицательного электрода во внешнюю цепь, одновременно с этим на электрод поступают отрицательные ионы кислотного остатка SO_4^- . В результате на отрицательном электроде возникает химическая реакция, уравнение которой в молекулярной форме можно записать так:



т. е. губчатый свинец Pb , соединяясь с кислотным остатком SO_4 , образует сернокислый свинец $PbSO_4$.

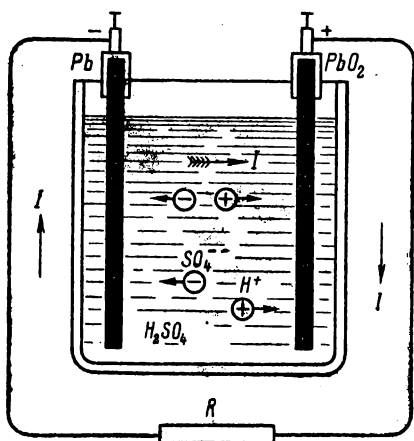


Рис. 427. Принципиальная схема разряда свинцового аккумулятора

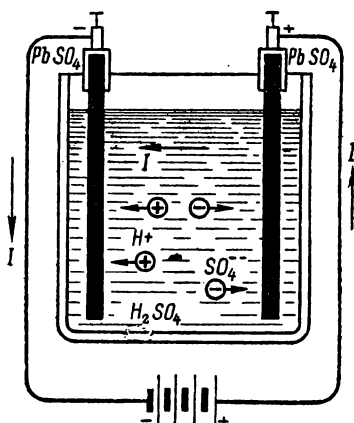
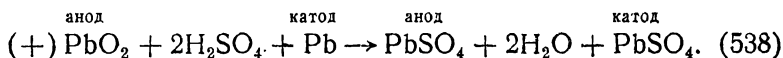


Рис. 428. Принципиальная схема заряда свинцового аккумулятора

Следовательно, уравнение токообразующего процесса при разряде кислотного аккумулятора можно записать в молекулярной форме следующим образом:



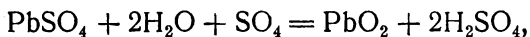
Отсюда мы видим, что в процессе разряда аккумулятора его электроды, ранее имевшие разнородные вещества на своих поверхностях — перекись свинца PbO_2 и губчатый свинец Pb , в конце разряда покрываются однородным веществом — сернокислым свинцом $PbSO_4$. Но как только исчезает разнородность веществ электродов аккумулятора, исчезает и его способность преобразовывать химическую энергию в электрическую.

По мере разряда свинцового аккумулятора в нем расходится серная кислота и образуется вода. Следовательно, плотность раствора серной кислоты к концу разряда аккумулятора уменьшается. По плотности раствора серной кислоты в аккумуляторе можно судить о степени его разряда.

3. Электрохимические процессы при заряде аккумулятора. Чтобы восстановить аккумулятор как источник электрической энергии, его необходимо зарядить. При заряде аккумулятора положительные ионы водорода 2H^+ перемещаются от анода к катоду, а отрицательные ионы кислотного остатка — от катода к аноду.

На рис. 428 показана принципиальная схема заряда кислотного аккумулятора.

Процесс на положительном электроде. С положительного электрода убывают в сторону источника электрической энергии свободные электроны и одновременно с этим из электролита на этот электрод прибывают отрицательные ионы кислотного остатка SO_4^- . В результате на положительном электроде с участием воды H_2O происходит химическая реакция, уравнение которой в молекулярном виде можно представить так:



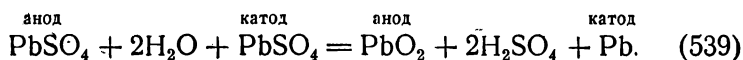
т. е. при заряде кислотного аккумулятора на положительном электроде расходуются сернокислый свинец PbSO_4 , вода H_2O и кислотный остаток SO_4 и образуется перекись свинца PbO_2 , а в электролите образуется серная кислота H_2SO_4 .

Процесс на отрицательном электроде. Свободные электроны поступают на отрицательный электрод при заряде, одновременно с этим туда же поступают положительные ионы водорода 2H^+ . В результате там возникает химическая реакция, уравнение которой в молекулярной форме можно записать так:



т. е. на отрицательном электроде при заряде кислотного аккумулятора расходуются сернокислый свинец PbSO_4 и водород H_2 и возникает губчатый свинец Pb , а в электролите образуется серная кислота H_2SO_4 .

Следовательно, уравнение токообразующего процесса при заряде кислотного аккумулятора можно записать в молекулярной форме следующим образом:



Отсюда мы видим, что в процессе заряда кислотного аккумулятора его электроды, ранее имевшие однородное вещество

(сернокислый свинец $PbSO_4$), в конце заряда покрываются разнородными веществами: перекисью свинца PbO_2 и губчатым свинцом Pb . Следовательно, аккумулятор вновь приобретает свойства химического источника электрической энергии.

По мере заряда аккумулятора в нем расходуется вода и образуется серная кислота, следовательно, плотность раствора серной кислоты непрерывно растет.

К концу заряда, когда сернокислый свинец на аноде почти полностью превращается в перекись свинца, а на катоде — в губчатый свинец, начинается быстро нарастающее выделение кислорода и водорода из аккумулятора. Бурное выделение пузырьков газа — водорода и кислорода с поверхности электролита внешне напоминает «кипение» жидкости. Сильное «кипение» аккумулятора — один из основных признаков того, что аккумулятор заряжен. Обычно для полного заряда аккумулятора необходимо дать ему «кипеть» не менее одного — двух часов. Чтобы снизить степень кипения аккумулятора, рекомендуется в конце заряда проводить его менее интенсивно, снизив несколько величину зарядного тока.

Электрические данные свинцового аккумулятора

1. Напряжение U на зажимах аккумулятора зависит от степени его заряженности и от нагрузки.

При заряде аккумулятора напряжение на его зажимах U всегда больше электродвижущей силы E на величину падения напряжения $U_0 = Ir_0$ в нем, т. е.

$$U = E + Ir_0, \quad (540)$$

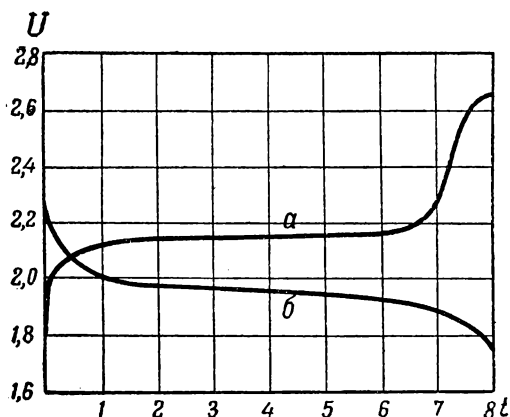


Рис. 429. Кривые изменения напряжения свинцового аккумулятора при заряде (а) и разряде (б)

где r_0 — внутреннее сопротивление аккумулятора;
 I — величина зарядного тока.

На рис. 429 показана характерная кривая a заряда кислотного аккумулятора. Здесь по горизонтальной оси отложено время заряда аккумулятора в часах, а по вертикальной оси — величина напряжения на его зажимах в вольтах. Из графика видно, что

в начале заряда напряжение от 1,8 до 2,1 в растет очень быстро. Затем кривая зарядного напряжения становится более пологой и на протяжении примерно 4—6 часов медленно увеличивается до 2,3 в. И потом, когда аккумулятор почти зарядился полностью, напряжение на его зажимах вновь резко растет до величины 2,7—2,8 в. В эти моменты крутого подъема напряжения на зажимах аккумулятора последний начинает бурно «кипеть», т. е. интенсивно выделять с поверхности электролита газы — кислород и водород.

Если прекратить заряд аккумулятора, отключив его от источника электрической энергии, то напряжение на его зажимах тотчас же упадет примерно до 2,2—2,3 в.

При разряде аккумулятора напряжение на его зажимах меньше электродвижущей силы аккумулятора E на величину падения напряжения U_0 внутри него:

$$U = E - Ir_0,$$

где I — величина разрядного тока.

В начале разряда напряжение на зажимах аккумулятора относительно быстро падает до 1,95 в, затем в течение нескольких часов плавно уменьшается до 1,85 в (на рис. 429 кривая б) и после этого резко падает, стремясь к нулю. В зависимости от условий аккумуляторы иногда разряжаются в течение относительно продолжительного времени. Например, аккумуляторные батареи, питающие телеграфные цепи, обычно разряжаются в течение нескольких суток относительно малым разрядным током.

Разряжать аккумулятор ниже напряжения 1,85 в не рекомендуется, так как он может испортиться.

Среднее разрядное напряжение свинцового аккумулятора для практических расчетов принимается равным $U = 2$ в.

Указанный режим изменения зарядного и разрядного напряжений на зажимах свинцового аккумулятора относится к случаю, когда аккумулятор заряжается и разряжается нормальным током, свойственным данному типу аккумулятора. При больших токах химические процессы в аккумуляторах протекают более бурно, и в соответствии с этим графики зарядного и разрядного напряжений могут резко изменяться.

2. Величина электродвижущей силы аккумулятора зависит от состояния активных веществ его пластин и от концентрации раствора серной кислоты. Если в аккумуляторе имеется нормальная плотность серной кислоты (1,18), то его электродвижущая сила $E = 2$ в. Но так как при эксплуатации аккумулятора плотность раствора серной кислоты в нем изменяется в сравнительно малых пределах (от 1,15 до 1,2), то и электродвижущая сила аккумулятора изменяется в относительно малых пределах, примерно от 1,95 до 2,05 в.

Влияние температуры на величину электродвижущей силы аккумулятора очень мало, а поэтому им практически можно пренебречь.

3. Внутреннее сопротивление аккумулятора зависит от размеров пластин аккумулятора, от расстояния между пластинами, от удельного сопротивления электролита и от температуры. Так как состояние электролита при разряде и заряде аккумулятора меняется, то в соответствии с этим меняется и внутреннее сопротивление аккумулятора. В конце заряда плотность раствора серной кислоты больше, чем в конце разряда, а поэтому аккумулятор в заряженном виде имеет несколько меньшее внутреннее сопротивление, чем в разряженном.

Внутреннее сопротивление свинцовых аккумуляторов по сравнению с внутренними сопротивлениями гальванических элементов очень мало вследствие больших размеров пластин и очень малого расстояния между ними.

Величина внутреннего сопротивления аккумуляторов измеряется сотыми и тысячными долями ома.

4. Отдача кислотного аккумулятора по количеству электричества в среднем равна $K = 0,9$.

5. Коэффициент полезного действия кислотного аккумулятора в среднем равен $\eta = 0,7—0,75$.

Отечественная электропромышленность освоила выпуск разнообразных типов кислотных аккумуляторов: СТ (стартерные), С (стационарные), СК (стационарные, допускающие одночасовой разряд), РН (радионакальные), РАДАН (радиоанодные) и др. В табл. 58, помещенной в главе XXXIV, приведены справочные данные некоторых типов батарей кислотных аккумуляторов, выпускаемых нашей электропромышленностью.

§ 192. ЭКСПЛУАТАЦИЯ КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

При составлении раствора электролита необходимо брать дистиллированную воду в количестве, потребном для получения необходимой плотности раствора серной кислоты.

В табл. 53 указано, какое количество серной кислоты содержится в одном литре электролита при заданной его плотности.

В табл. 54 указано количество серной кислоты, содержащееся в одном литре концентрированного раствора серной кислоты.

Чтобы получить из концентрированного раствора серной кислоты электролит заданной плотности, необходимо добавить в него некоторое количество воды, сообразуясь с данными, приведенными в табл. 53 и 54.

При составлении раствора серной кислоты следует вначале налить в стеклянную посуду необходимое количество дистиллированной воды, а затем осторожно тонкой струйкой вливать в нее потребное количество химически чистой серной кислоты.

**Содержание серной кислоты в одном литре электролита
при заданной его плотности**

Плотность электролита	Содержание серной кислоты на 1 л электролита, г	Плотность электролита	Содержание серной кислоты на 1 л электролита, г
1,11	175	1,23	382
1,12	191	1,24	400
1,13	207	1,25	418
1,14	223	1,26	435
1,15	239	1,27	454
1,16	257	1,28	472
1,17	275	1,29	490
1,18	292	1,30	510
1,19	310	1,31	529
1,20	328	1,32	548
1,21	355	1,385	672
1,22	364	—	—

Запрещается при составлении раствора серной кислоты **лить в серную кислоту воду**, так как капли воды, соприкасаясь с серной кислотой, сильно нагреваются и испаряются. Вырываясь с поверхности воды, они уносят с собой (разбрызгивают) капельки серной кислоты. Последние, попадая на кожу лица и рук, могут произвести ожоги или порчу одежды. В случае ожога серной кислотой необходимо место ожога немедленно промыть раствором соды, а затем холодной водой.

Качество и плотность электролита влияют на емкость аккумулятора, а поэтому рекомендуется не повышать и не понижать процентное содержание серной кислоты в растворе более чем на 5%.

Нормальной температурой электролита кислотного аккумулятора надо считать 25° Ц. Повышение температуры свыше 40° Ц недопустимо.

Таблица 54

**Содержание серной кислоты
в ее концентрированных растворах**

Плотность концентрированного раствора	Содержание серной кислоты в 1 л концентрированного раствора, г
1,80	1560
1,81	1595
1,82	1638
1,83	1690
1,84	1750

Уровень электролита в кислотном аккумуляторе должен быть выше верхнего края пластин примерно на 10 мм. Доливать электролит в аккумулятор, как правило, надо перед его зарядом.

Заряжать аккумулятор необходимо током, не превышающим нормальный зарядный ток, отмеченный в паспорте аккумулятора. После того как напряжение на зажимах аккумулятора при заряде достигнет 2,4 в, рекомендуется снизить величину зарядного тока примерно в 2 раза.

Заряд аккумулятора необходимо всякий раз доводить до конца, т. е. до того момента, когда напряжение на зажимах аккумулятора становится равным примерно 2,75 в и затем в течение последующих 20—30 минут сохраняется неизменным по величине. В этом случае плотность электролита достигает максимума и перестает также увеличиваться. В конце заряда в аккумуляторе наблюдается бурное «кипение» электролита.

Разряжать аккумулятор в нормальных условиях следует током, не превышающим нормальную величину разрядного тока, обычно указываемую в паспорте аккумулятора.

Нельзя аккумулятор оставлять незаряженным более суток, так как пластины его будут покрываться не растворимыми в воде крупными кристаллами сульфата, резко снижающего емкость аккумулятора.

Надо помнить, что кислотный аккумулятор в силу его саморазряда теряет ежедневно около 2% номинальной емкости, а поэтому, если его своевременно не заряжать, он спустя некоторое время полностью разрядится и его пластины покроются слоем сульфата. При сульфатации отрицательные пластины покрываются белым налетом, а положительные приобретают желтоватый оттенок. Сульфат нельзя снять с пластин путем повторных зарядов и разрядов. При сильной сульфатации пластин аккумулятор обычно выбывает из строя. При слабой сульфатации сульфат с пластин можно удалить механическим способом, например соскоблить. После снятия сульфата рекомендуется залить аккумулятор слабым раствором серной кислоты и зарядить относительно слабым током.

Если кислотный аккумулятор необходимо на несколько месяцев оставить без эксплуатации, то рекомендуется его предварительно разрядить, снизив напряжение на его зажимах до 1,7 в. Затем следует вылить электролит из аккумулятора, а последний промыть чистой водой так, чтобы в нем не осталось никаких следов серной кислоты. Присутствие серной кислоты в аккумуляторе можно обнаружить с помощью лакмусовой бумаги, которая, как правило, краснеет при смачивании ее водой, содержащей в себе даже весьма малое количество серной кислоты. После тщательной промывки аккумулятора чистой водой отверстие в аккумуляторе следует плотно закрыть пробкой.

Если кислотный аккумулятор необходимо хранить заряженным, то рекомендуется не реже одного раза в месяц заряжать

его полностью, так как в результате саморазряда аккумулятор может разрядиться полностью и его пластины в дальнейшем покроются сульфатом.

Запрещается в аккумуляторном помещении зажигать огонь, курить, пользоваться рубильниками и иными выключателями тока, при размыкании которых может возникнуть электрическая искра. Это вызывается тем, что кислород и водород, выделяющиеся из электролита аккумуляторов, образуют гремучий газ, который при воспламенении может дать сильный взрыв.

ГЛАВА XXXIII ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

§ 193. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Гальваническим элементом называется источник электрической энергии, в котором, так же как и в аккумуляторе, электрическая энергия получается за счет расхода химической энергии активных веществ. Однако в отличие от аккумулятора в гальваническом элементе происходит необратимый электрохимический процесс — процесс преобразования химической энергии в электрическую, а последняя уже не может быть преобразована опять в химическую.

При изготовлении гальванического элемента в него закладываются в готовом виде активные вещества, которые он расходует при работе. По мере расхода активных веществ емкость элемента убывает, и когда она достигает некоторого предельного минимума, гальванический элемент становится непригодным для дальнейшей эксплуатации.

Всякий гальванический элемент состоит из двух разнородных по своим химическим свойствам элементов, погруженных в электролит. В результате химического взаимодействия электродов с электролитом в элементе образуется гальваническая пара. Один из электродов заряжается положительным электричеством, а другой — отрицательным. Электродвижущая сила гальванического элемента численно равна разности потенциалов на его зажимах при разомкнутой внешней цепи, т. е. напряжению его холостого хода.

В процессе работы гальванического элемента внутри его электролита проходит ионный электрический ток. В результате этого на электродах элемента отлагаются вещества, которые могут создавать поляризацию электродов.

Электродвижущая сила поляризации, как правило, направлена навстречу основной электродвижущей силе элемента. Это приводит к уменьшению результирующей электродвижущей силы элемента и нарушает его нормальную работу.

Поляризацию электродов элемента подразделяют на устраняемую и неустраняемую.

Неустраняемая поляризация обусловлена качественным изменением электролита и активных веществ электродов элемента. Она снижает электродвижущую силу элемента. В этом случае путем выключения из цепи элемента нельзя восстановить его первоначальный химический состав и начальную электродвижущую силу.

Устраняемая поляризация вызывается многими причинами и происходит при всяком электродном процессе и, в частности, в любом химическом источнике электрической энергии. Но в отличие от неустраняемой поляризации устраняемая поляризация исчезает в элементе при отключении его от внешней цепи. Например, когда элемент работает, состав его электролита изменяется наиболее сильно вблизи его электродов, что вызывает уменьшение разности потенциалов между ними. Если элемент выключить из цепи, т. е. прекратить ток в нем, то состав электролита выравнивается и потенциалы электродов, а также и электродвижущая сила элемента достигнут вновь примерно своего первоначального значения.

В целях борьбы с вредным явлением поляризации в гальванические элементы вводят химические вещества, называемые деполаризаторами, способные значительно снижать поляризацию. Работа деполаризатора в основном сводится к поглощению веществ, создающих поляризацию. Примером деполаризатора может служить медный купорос CuSO_4 , применяемый в медно-цинковом элементе. Путем поглощения водорода и выделения взамен него меди на медном электроде деполаризатор предотвращает возникновение поляризационной электродвижущей силы. В современных гальванических элементах в качестве деполаризатора наиболее широко применяется двуокись марганца MnO_2 . Существуют элементы и с марганцово-воздушной деполаризацией, где в качестве деполаризатора, помимо двуокиси марганца, используется и кислород воздуха. Гальванические элементы благодаря их малому весу, портативности, постоянной готовности к действию, простоте конструкции и удобству эксплуатации получили широкое применение на практике.

§ 194. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ С МАРГАНЦОВОЙ ДЕПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

Гальванические элементы с марганцовой деполаризацией подразделяются на два основных типа — сухие (С) и водоналивные (В).

1. Сухие элементы

На рис. 430, а показан в разрезе сухой элемент. Сосудом для него является цинковая коробка, которая одновременно с этим служит отрицательным электродом элемента.

Цинковый электрод изготавливается из электролитического, т. е. химически чистого, цинка. Высокие требования, предъявляемые к качеству цинка, объясняются тем, что примеси, например железа, меди, приводят к образованию в элементе гальванических пар, создающих местные разрядные токи. В результате саморазряда элемента он весьма быстро может выйти из строя.

На дне цинковой коробки установлен положительный электрод из двуокиси марганца MnO_2 . Для токоотвода в нем применяется угольный стержень, вокруг которого расположена запрессованная масса двуокиси марганца.

Для улучшения проводимости двуокись марганца механически смешивается с графитом, которого берут примерно 20% смеси. Механическая смесь двуокиси марганца с графитом обычно называется агломератом-деполяризатором.

Пространство между агломератом и цинковой коробкой заполнено пастой или студенистой массой, составленной из 20% раствора хлористого аммония (нашатыря) NH_4Cl и муки с примесью хлористого цинка.

В верхней части цинковой коробки помещена картонная шайба, верх которой залит смолкой, закупоривающей элемент и скрепляющей его детали. Между верхней частью агломерата и

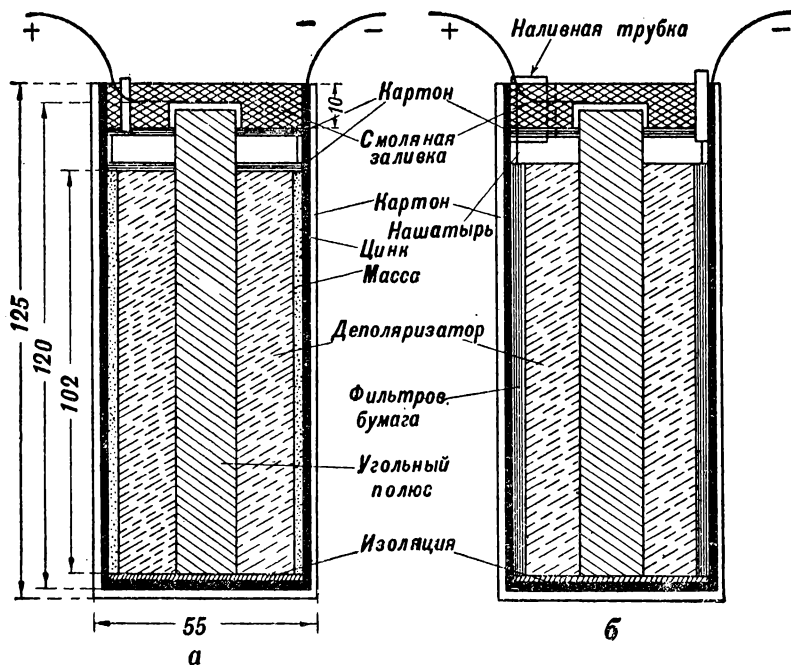


Рис. 430. Сухой (а) и водоналивной (б) гальванические элементы

картонной шайбой оставлено свободное пространство для сосредоточения газов, которые отсюда выходят через тонкую стеклянную трубочку.

К цинковой коробке припаян гибкий проводник, а на угольный электрод надет металлический колпачок, к которому также припаян гибкий проводник для присоединения к внешней цепи.

Снаружи цинковая коробка защищена картонным футляром, на котором обычно указываются основные данные элемента: его марка, электродвижущая сила, емкость и др. (рис. 431).

Электродвижущая сила сухого элемента в начале разряда равна примерно 1,5 в. Внутреннее сопротивление сухого элемента зависит от его размеров и степени изношенности. Оно колеблется от 0,25 ом до нескольких ом в конце разряда.



Рис. 431. Внешний вид сухого элемента типа 3С-Л-30

II. Водоналивные элементы

В отличие от сухого элемента, который готов к действию с момента изготовления, водоналивной элемент необходимо перед началом эксплуатации залить водой, так как активное вещество его электролита находится в сухом состоянии.

На рис. 430, б показан в разрезе водоналивной элемент. Здесь в отличие от сухого элемента пространство между агломератом и цинковой коробкой плотно заполнено пропускной бумагой, а сверху деполяризатора помещен сухой хлористый аммоний NH_4Cl , прикрытый сверху картонной прокладкой.

В верхней части элемента имеется стеклянная трубочка, проходящая через смоляную заливку. Через эту трубочку при заряде элемента вводится вода, которая, растворив сухой хлористый аммоний, образует электролит.

Газы, образующиеся в элементе при его работе, отводятся через тонкую стеклянную трубку.

Водоналивной элемент считается окончательно готовым к эксплуатации через 6 часов после его заливки водой.

Электродвижущая сила свежезаряженного водоналивного элемента равна 1,5 в.

Внутреннее сопротивление водоналивного элемента колеблется от 0,5 ом до нескольких ом в конце разряда.

В табл. 55 приведены основные данные некоторых сухих и водоналивных элементов, изготавливаемых нашей электропромышленностью.

Т а б л и ц а 55

Основные данные элементов с марганцовой поляризацией

Условные обозначения элементов	Начальная э.д.с., в	Начальное напряжение, в	Начальная емкость, а-ч	Срок хранения в заряженном состоянии, месяцы	Емкость в конце срока хранения, а-ч	Вес элементов		Вес воды для заливки водоналивных элементов, кг
						сухих, кг	водоналивные в незаполненном виде, кг	
1С-Л-3	1,5	1,4	3,1	12	2,2	0,145	—	—
2С-Л-9	1,5	1,42	9,0	12	6,5	0,3	—	—
3С-Л-30	1,5	1,44	30,0	18	24,0	0,7	—	—
3С-Х-30	1,65	1,6	30,0	18	24,0	0,7	—	—
3С-У-30	1,65	1,6	30,0	18	24,0	0,7	—	—
4С-Л-37	1,5	1,42	37,0	18	28,0	1,1	—	—
1В-Л-3	1,5	1,4	3,1	12	2,2	—	0,14	0,030
2В-Л-8,5	1,5	1,42	8,5	12	6,0	—	0,28	0,045
3В-Л-27	1,5	1,44	27,0	12	22,0	—	0,65	0,100
4В-Л-31	1,5	1,42	31,0	12	25,0	—	1,0	0,175

Примечание. Первая цифра, стоящая в условном обозначении элемента, указывает размер его (самый малый размер — 1 и самый большой — 4). Буква С обозначает, что элемент сухой, а буква В — водоналивной. Буква Л обозначает, что элемент летний, буква Х — хладостойкий и буква У — универсальный. Последние цифры условных обозначений указывают начальную емкость элемента. Например, условное обозначение элемента 4С-Л-37 говорит о том, что данный элемент — четвертого (4), т. е. самого большого, размера из существующих типов элементов, что он сухой (С), летний (Л), емкость его 37 ампер-часов.

Ниже приведена табл. 56, показывающая, в каких пределах температур допускается эксплуатация элементов.

Т а б л и ц а 56

Температурные интервалы работы элементов

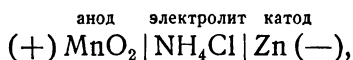
Условные обозначения на элементе	Наименование элемента	Предельные температуры при эксплуатации элемента °С
У	Универсальный	От —40 до +60
Л	Летний	От —20 до +60
Х	Хладостойкий	От —40 до +40

Номинальной емкостью гальванического элемента называется то количество электричества, которое он отдает при непрерывном разряде его на некоторое стандартное внешнее сопротивление при средней температуре 20° С до того момента, когда напряжение на его зажимах окажется равным 0,7 в.

Элементы с марганцовой деполяризацией, предназначенные для питания радиотехнических цепей накала, рассчитываются на максимум разрядного тока 0,1—0,2 а.

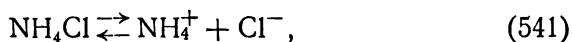
III. Процессы при работе элементов с марганцовой деполяризацией

Свежезаряженный элемент с марганцовой деполяризацией представляет собой электрохимическую систему следующего состава:



т. е. электролитом в элементе служит водный раствор хлористого аммония NH_4Cl , активным веществом положительного электрода (анода) служит двуокись марганца MnO_2 . Двуокись марганца здесь играет роль также деполяризатора. Активным веществом отрицательного электрода является цинк Zn .

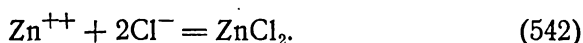
В электролите независимо от того, работает элемент или нет, происходит непрерывный процесс диссоциации молекул хлористого аммония NH_4Cl согласно следующему уравнению:



т. е. молекула хлористого аммония NH_4Cl распадается на положительный однозарядный ион аммония NH_4^+ и отрицательный ион хлора Cl^- .

Если к гальваническому элементу подключить потребитель, то в цепи возникнет электрический ток. Свободные электроны начнут перемещаться по внешней цепи от катода к аноду. Положительные ионы аммония NH_4^+ будут перемещаться внутри электролита от катода к аноду, а отрицательные ионы хлора Cl^- — от анода к катоду.

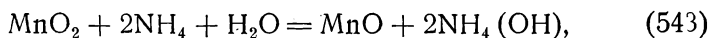
Процесс на отрицательном электроде (катоде). Положительные двухзарядные ионы цинка Zn^{++} покидают положительную пластину под влиянием сторонних сил. В электролите они вступают во взаимодействие с отрицательными ионами хлора и совместно с ними образуют хлористый цинк:



Цинковый электрод, лишившись части положительных ионов цинка Zn^{++} , заряжается отрицательным электричеством (избыток электронов).

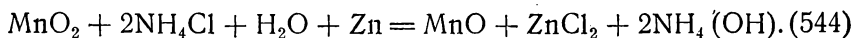
Процесс на положительном электроде (аноде). На положительный электрод поступают из внешней цепи

свободные электроны и, кроме этого, со стороны электролита — положительные ионы аммония NH_4^+ . В результате этого на аноде возникает химическая реакция, уравнение которой в молекулярном виде запишем так:



т. е. двуокись марганца MnO_2 , соединяясь с аммонием 2NH_4 и водой H_2O , образует окись марганца MnO и гидроксид аммония $2\text{NH}_4(\text{OH})$.

Таким образом, токообразующую реакцию в элементе с марганцовой деполяризацией можно в молекулярной форме представить уравнением в следующем виде:



По мере расхода двуокиси марганца MnO_2 и цинка Zn гальванический элемент теряет свои активные вещества и свою емкость.

Кроме полезных токообразующих реакций, в гальванических элементах происходят еще и побочные, вредные процессы. Некоторые из них являются неизбежными спутниками основных токообразующих процессов, другие вызваны неудовлетворительным качеством материалов, дефектами конструкции и производства, неправильной или небрежной эксплуатацией.

Общий вред всех паразитных процессов в элементах заключается в том, что они происходят постоянно и независимо от того, работает элемент или нет. Все они вызывают бесполезный расход активных веществ, из-за чего сокращается количество энергии, полезно отдаваемой элементом, т. е. сокращается срок службы элемента. Емкость не эксплуатируемого элемента в конце срока его хранения сокращается в среднем на 20—25%. Паразитные процессы в элементе, связанные с потерей им емкости, называются саморазрядом элемента.

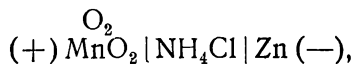
§ 195. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ С МАРГАНЦОВО-ВОЗДУШНОЙ ДЕПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

В гражданской технике связи получили применение гальванические элементы с марганцово-воздушной деполяризацией (МВД).

Конструктивная особенность этих элементов по сравнению с обычными элементами марганцовой деполяризации состоит в том, что в них обеспечен доступ наружного воздуха к активным веществам положительного электрода (агломерату). В силу этого деполяризация в данном элементе осуществляется за счет не только двуокиси марганца, но и кислорода воздуха. Это значительно улучшает эксплуатационные качества элемента и увеличивает его емкость по сравнению с обычными элементами мар-

ганцовой поляризации (при прочих равных условиях) примерно в 1,5—2 раза.

Электрохимическая система элемента с марганцово-воздушной деполяризацией следующая:



т. е. на аноде, помимо двуокиси марганца MnO_2 , имеются молекулы кислорода O_2 воздуха.

Агломерат элемента с марганцово-воздушной деполяризацией состоит на одну треть из двуокиси марганца, а остальная часть приходится на долю активированного угля и графита.

Элементы с марганцово-воздушной деполяризацией боятся перегрузки больше, чем обычные элементы. При незначительной перегрузке током они уже работают, как и обычные элементы с марганцовой деполяризацией, т. е. воздушная деполяризация в них в этом случае мало ощутима.

ГЛАВА XXXIV

СОЕДИНЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В БАТАРЕИ

§ 196. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Электродвижущие силы химических источников электрической энергии относительно малы. Например, электродвижущая сила щелочных аккумуляторов и гальванических элементов марганцовой деполяризации менее 2 в, а кислотного аккумулятора — не сколько выше. Незначительная величина электродвижущей силы не дает возможности применять одиночные элементы (аккумуляторы и гальванические элементы) для обслуживания потребителей, номинальное напряжение которых измеряется, например, десятками вольт. Чтобы можно было питать электрической энергией потребители подобного рода, необходимо соединить элементы в батарею так, чтобы электродвижущая сила ее была больше номинального напряжения потребителя.

Предельная нагрузка элементов также весьма ограничена. Например, гальванический элемент с марганцовой деполяризацией не рекомендуется разряжать током более 0,1 а. Аккумуляторы малых емкостей также могут давать относительно малые разрядные токи. Следовательно, в тех случаях, когда потребитель рассчитан на относительно большой номинальный ток, одиночный элемент уже не в состоянии его обслужить. Поэтому приходится элементы соединять в батарею так, чтобы она давала величину тока, необходимую для нормальной работы данного потребителя. И, наконец, в тех случаях, когда потребитель рассчитан на относительно большие номинальные напряжения и ток (на относительно большую мощность), можно опять путем соответствующего соединения элементов добиться нормальной его работы.

В современной технике батареи аккумуляторов и гальванических элементов нашли самое широкое применение. Советская электропромышленность выпускает самые разнообразные типы батарей элементов, например, накаливающие (батареи, питающие ток нить накала электронных ламп), анодные (батареи, питающие анодные цепи радиотехнических устройств), стартерные (ба-

тарей, применяемые для пуска двигателей) и т. д. С электрическими данными некоторых из них мы познакомимся в конце этой главы.

§ 197. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ (ЭЛЕМЕНТОВ)

При последовательном соединении элементов (аккумуляторов или гальванических элементов) в батарею они соединяются друг с другом в ряд разноименными полюсами.

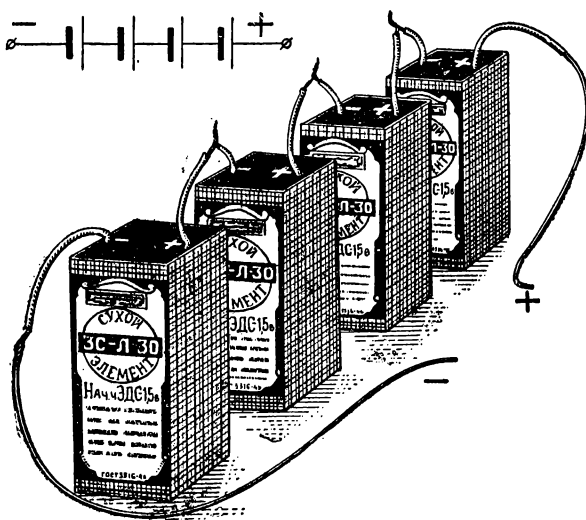


Рис. 432. Батарея последовательно соединенных элементов и ее условное обозначение

На рис. 432 показано последовательное соединение четырех гальванических элементов типа 3С-Л-30 в батарею.

Последовательное соединение элементов применяется в том случае, когда ток I потребителя не превышает номинального разрядного тока элемента, а номинальное напряжение потребителя U больше электродвижущей силы E_0 (напряжения U_0) отдельного элемента.

При последовательном соединении элементов элементы должны обладать одинаковыми электрическими емкостями.

Если батарея составлена из n однотипных элементов, т. е. элементов, обладающих одинаковыми электродвижущей силой E_0 и внутренним сопротивлением r_0 , то общая электродвижущая сила такой батареи равна

$$E = nE_0, \quad (545)$$

т. е. электродвижущая сила E батареи последовательно соединенных одинаковых элементов равна электродвижущей силе одного элемента E_0 , умноженной на число элементов n батареи.

Полное внутреннее сопротивление R_0 батареи в этом случае равно

$$R_0 = nr_0, \quad (546)$$

т. е. полное внутреннее сопротивление R_0 батареи последовательно соединенных одинаковых элементов равно внутреннему сопротивлению r_0 одного элемента, умноженному на число элементов n батареи.

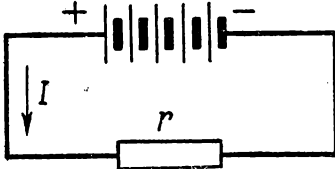


Рис. 433. Схема электрической цепи с последовательно соединенными элементами и внешним сопротивлением

Емкость батареи Q последовательно соединенных элементов равна емкости Q_0 одного элемента, так как ток, отдаваемый всей батареей в целом, равен току, отдаваемому каждым элементом в отдельности.

Если батарея последовательно соединенных элементов питает ток потребителя с сопротивлением r (рис. 433), то величину тока в цепи можно определить по формуле закона Ома

$$I = \frac{nE_0}{nr_0 + r}. \quad (547)$$

Напряжение U на зажимах батареи последовательно соединенных элементов равно

$$U = nE_0 - Inr_0 = n(E - Ir_0) = nU_0,$$

т. е. напряжение U на зажимах батареи последовательно соединенных элементов равно напряжению на зажимах отдельного элемента U_0 , помноженному на число элементов n батареи.

Электрический коэффициент полезного действия последовательно соединенных элементов равен

$$\eta_s = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{общ}}} = \frac{I^2 r}{I^2 (nr_0 + r)} = \frac{r}{nr_0 + r} = \frac{1}{n \frac{r_0}{r} + 1}. \quad (548)$$

Воспользовавшись формулой (547), можно вывести формулу для расчета числа n элементов, необходимого для питания заданным током I потребителя, обладающего сопротивлением r .

Из формулы (547)

$$nE_0 = Inr_0 + Ir,$$

или

$$nE_0 - Inr_0 = Ir,$$

откуда находим, что

$$n = \frac{Ir}{E_0 - Ir_0}. \quad (549)$$

Пример 209. Определить количество гальванических элементов типа ЗС-Л-30, необходимое для составления последовательной батареи, если электродвижущая сила одного элемента $E_0 = 1,5$ в, внутреннее сопротивление $r_0 = 0,8$ ом, сопротивление потребителя $r = 192$ ом, а величина тока в потребителе должна быть равна $I = 0,075$ а. Определить для данного режима работы батареи элементов напряжение на зажимах батареи и электрический коэффициент полезного действия батареи.

Решение. Применяя формулу (549), находим число элементов батареи:

$$n = \frac{Ir}{E_0 - Ir_0} = \frac{0,075 \cdot 192}{1,5 - 0,075 \cdot 0,8} = 10 \text{ элементов.}$$

Напряжение на зажимах батареи

$$U = nE_0 - Inr_0 = 10 \cdot 1,5 - 0,075 \cdot 10 \cdot 0,8 = 14,4 \text{ в.}$$

Электрический коэффициент полезного действия батареи

$$\eta_{эл} = \frac{1}{n \frac{r_0}{r} + 1} = \frac{1}{10 \cdot \frac{0,8}{192} + 1} = 0,96, \text{ или } \eta_{эл} = 96\%.$$

Пример 210. Аккумуляторная батарея типа 10НКН-22М состоит из $n = 10$ последовательно соединенных щелочных кадмиево-никелевых аккумуляторов, каждый из которых имеет электродвижущую силу $E_0 = 1,25$ в и номинальную емкость $Q_0 = 22$ ампер-часа. Определить внутреннее сопротивление одного аккумулятора, внутреннее сопротивление всей батареи аккумуляторов, величину тока в цепи и через сколько часов разрядится батарея, если потребитель, который питается от нее электрической энергией, имеет сопротивление $r = 20$ ом.

Решение. Внутреннее сопротивление одного аккумулятора согласно формуле (534) равно

$$r_0 = \frac{0,3}{Q_0} = \frac{0,3}{22} = 0,0135 \text{ ом.}$$

Внутреннее сопротивление батареи аккумуляторов

$$R_0 = nr_0 = 10 \cdot 0,0135 = 0,135 \text{ ом,}$$

т. е. оно очень мало по сравнению с внешним сопротивлением (в $\frac{20}{0,135} = 140$ раз меньше), а поэтому при расчете тока внутренним сопротивлением батареи можно пренебречь.

Величина тока в цепи в этом случае равна

$$I = \frac{nE_0}{nr_0 + r} \approx \frac{nE_0}{r} = \frac{10 \cdot 1,25}{20} = 0,625 \text{ а.}$$

Так как емкость батареи последовательно соединенных аккумуляторов Q равна емкости Q_0 отдельного аккумулятора, входящего в батарею, то время полного разряда аккумуляторной батареи

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{Q_0}{I} = \frac{22}{0,625} = 35,2 \text{ часа.}$$

§ 198. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ (ЭЛЕМЕНТОВ)

При параллельном соединении элементов (аккумуляторов или гальванических элементов) в батарею они соединяются друг с другом одноименными полюсами.

На рис. 434 показано параллельное соединение четырех гальванических элементов типа ЗС-Л-30 в батарею.

Параллельное соединение элементов применяется в том случае, когда напряжение потребителя равно напряжению на зажимах отдельного элемента, входящего в батарею, а ток потребителя I больше предельного разрядного тока $I_{\text{разр}}$ отдельного элемента, т. е. $I > I_{\text{разр}}$.

Батарея параллельно соединенных элементов, как правило, собирается из одинакового типа элементов, так как иначе возможен разряд одних элементов батареи через другие.

Электродвижущая сила E батареи параллельно соединенных элементов равна электродвижущей силе E_0 одного элемента:

$$E = E_0. \quad (550)$$

Полное внутреннее сопротивление R_0 батареи параллельно соединенных элементов равно внутреннему сопротивлению r_0 одного элемента, деленному на число m элементов в батарее:

$$R_0 = \frac{r_0}{m}. \quad (551)$$

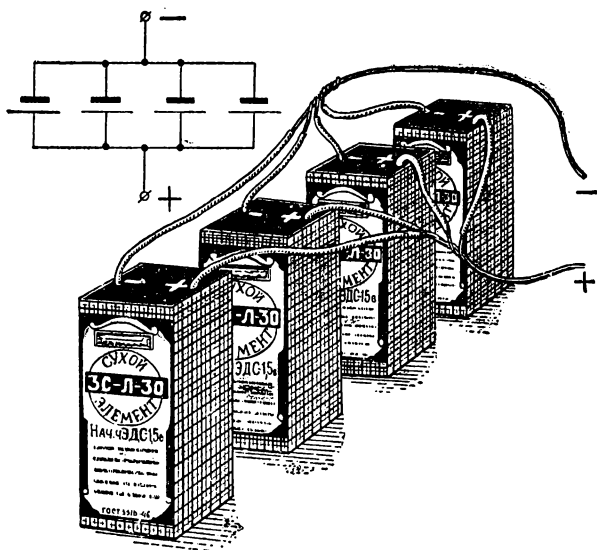


Рис. 434. Батарея параллельно соединенных элементов и ее условное обозначение

Если батарея параллельно соединенных элементов питает ток потребителем с сопротивлением r (рис. 435), то величину тока I , отдаваемого всей батареей элементов, можно определить по формуле закона Ома

$$I = \frac{E_0}{\frac{r_0}{m} + r}, \quad (552)$$

а ток I_0 , отдаваемый каждым элементом батареи, в этом случае равен

$$I_0 = \frac{I}{m}, \quad (553)$$

т. е. ток I_0 , протекающий через каждый отдельный элемент, равен току I , отдаваемому всей батареей, разделенному на число элементов m батареи.

В соответствии с этим емкость Q всей батареи параллельно соединенных элементов равна емкости Q_0 одного элемента, умноженной на число элементов m батареи:

$$Q = mQ_0. \quad (554)$$

Напряжение на зажимах батареи параллельно соединенных элементов равно

$$U = E_0 - I \frac{r_0}{m} = E_0 - I_0 r_0, \quad (555)$$

т. е. напряжение U на зажимах батареи параллельно соединенных элементов равно электродвижущей силе E_0 одного элемента минус падение напряжения в одном элементе.

Электрический коэффициент полезного действия батареи параллельно соединенных элементов равен

$$\eta_{\text{эл}} = \frac{P_{\text{пол}}}{P_{\text{полн}}} = \frac{I^2 r}{I^2 \left(\frac{r_0}{m} + r \right)} = \frac{r}{\frac{r_0}{m} + r} = \frac{1}{\frac{r_0}{mr} + 1}. \quad (556)$$

Воспользовавшись формулой (552), можно вывести формулу для расчета числа элементов, необходимого для питания заданным током I потребителя, обладающего сопротивлением r .

Из формулы (552)

$$I \frac{r_0}{m} + Ir = E_0,$$

или

$$Ir_0 = (E_0 - Ir) m.$$

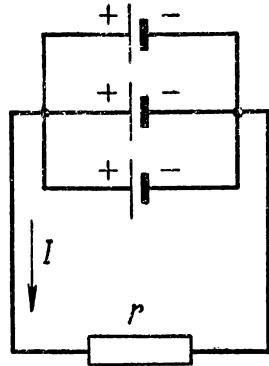


Рис. 435. Схема электрической цепи с параллельно соединенными элементами и внешним сопротивлением

Откуда находим, что

$$m = \frac{Ir_0}{E_0 - Ir} \quad (557)$$

Пример 211. Определить количество гальванических элементов типа ЗС-Л-30, необходимое для составления параллельной батареи, если электродвижущая сила одного элемента $E_0 = 1,5$ в, внутреннее сопротивление одного элемента $r_0 = 0,6$ ом, сопротивление потребителя $r = 4,85$ ом, а величина тока в потребителе должна быть равна $I = 0,3$ а. Определить также для данного режима величину тока I_0 , отдаваемого каждым элементом, и электрический коэффициент полезного действия батареи элементов.

Решение. Применяя формулу (557), находим число элементов батареи

$$m = \frac{Ir_0}{E_0 - Ir} = \frac{0,3 \cdot 0,6}{1,5 - 0,3 \cdot 4,85} = 4 \text{ элемента.}$$

Ток I_0 , отдаваемый каждым элементом в отдельности, равен

$$I_0 = \frac{I}{m} = \frac{0,3}{4} = 0,075 \text{ а.}$$

Электрический коэффициент полезного действия согласно формуле (556) равен

$$\eta_{эл} = \frac{1}{\frac{r_0}{mr} + 1} = \frac{1}{\frac{0,6}{4 \cdot 4,85} + 1} = 0,97, \text{ или } \eta_{эл} = 97\%.$$

§ 199. СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ (ЭЛЕМЕНТОВ)

Смешанное соединение элементов представляет собой сочетание последовательного и параллельного соединения элементов.

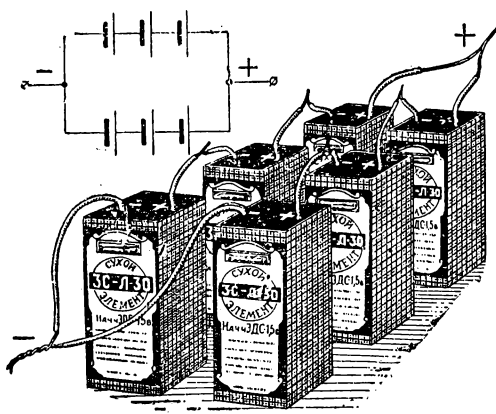


Рис. 436. Смешанное соединение элементов в батарею

На рис. 436 показана схема смешанно соединенных элементов. Здесь мы видим, что элементы в отдельных группах соединены последовательно, а сами группы соединены между собой параллельно.

Смешанное соединение элементов применяется в том случае, когда ток I и напряжение U потребителя больше электродвижущей силы E_0 (напряжения U_0) и разрядного тока $I_{разр}$ отдельного элемента.

Допустим, что в батарее смешанно соединенных

элементов имеется m , параллельно соединенных групп, каждая из которых составлена из n последовательно соединенных одинаковых элементов (рис. 436).

Электродвижущая сила E батареи смешанно соединенных элементов равна электродвижущей силе E_0 одного элемента, умноженной на число элементов n в одной группе

$$E = nE_0. \quad (558)$$

Полное внутреннее сопротивление R_0 батареи смешанно соединенных элементов равно внутреннему сопротивлению r_0 одного элемента, умноженному на число элементов n в группе и поделенному на число групп m в батарее:

$$R_0 = \frac{r_0 n}{m}, \quad (559)$$

где n — число последовательно соединенных элементов в каждой группе;

m — число параллельно соединенных групп.

Если батарея смешанно соединенных элементов питает ток потребителем с сопротивлением r (рис. 437), то величину тока I , отдаваемого всей батареей элементов, можно определить, исходя из формулы закона Ома

$$I = \frac{nE_0}{\frac{r_0 n}{m} + r}, \quad (560)$$

а ток I_0 , отдаваемый каждым элементом батареи, в этом случае равен

$$I_0 = \frac{I}{m}, \quad (561)$$

т. е. ток I_0 , протекающий через каждый отдельный элемент, равен току I , отдаваемому всей батареей, разделенному на число параллельных групп m всей батареи.

В соответствии с этим емкость Q всей батареи смешанно соединенных элементов равна емкости одного элемента Q_0 , умноженной на число параллельных групп m в батарее:

$$Q = mQ_0. \quad (562)$$

Напряжение на зажимах батареи смешанно соединенных элементов равно

$$U = nE_0 - \frac{Inr_0}{m} = E - IR_0. \quad (563)$$

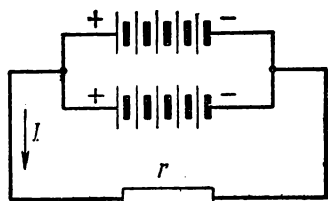


Рис. 437. Схема электрической цепи со смешанно соединенными элементами и внешним сопротивлением

Электрический коэффициент полезного действия батареи смешанно соединенных элементов равен

$$\eta_{эл} = \frac{P_{пол}}{P_{полн}} = \frac{I^2 r}{I^2 \left(\frac{n}{m} r_0 + r \right)} = \frac{1}{\frac{nr_0}{mr} + 1}. \quad (564)$$

Пример 212. Батарея смешанно соединенных гальванических элементов 30-Л-30 состоит из двух параллельных групп ($m=2$) по шесть элементов ($n=6$) в каждой.

Определить величину тока, отдаваемого батареей, напряжение на зажимах батареи, электрический коэффициент полезного действия батареи, а также время полного разряда батареи при непрерывной заданной нагрузке, если электродвижущая сила одного элемента $E_0=1,5$ в, внутреннее сопротивление $r_0=0,5$ ом, емкость $Q_0=30$ а-ч, а внешнее сопротивление $r=28,5$ ом.

Решение. Ток, отдаваемый батареей потребителю, согласно формуле (560) равен

$$I = \frac{nE_0}{\frac{n}{m} r_0 + r} = \frac{6 \cdot 1,5}{\frac{6 \cdot 0,5}{2} + 28,5} = 0,3 \text{ а.}$$

Напряжение на зажимах батареи

$$U = nE_0 - I \frac{nr_0}{m} = 6 \cdot 1,5 - 0,3 \cdot \frac{6 \cdot 0,5}{2} = 8,55 \text{ в.}$$

Емкость всей батареи

$$Q = mQ_0 = 2 \cdot 30 = 60 \text{ а-ч.}$$

Время разряда батареи

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{60}{0,3} = 200 \text{ часов.}$$

Пример 213. Требуется рассчитать аккумуляторную батарею для аварийного освещения на номинальную мощность $P=1,32$ квт при напряжении $U=110$ в, если в нашем распоряжении находятся аккумуляторные батареи типа 4НКН-60М, т. е. батареи, имеющие номинальное напряжение $U_0=5$ в, номинальный разрядный ток $I_{разр}=7,5$ а и номинальную емкость $Q_0=60$ а-ч. Внутренним сопротивлением батареи практически можно пренебречь.

Решение. Величина тока I при полной нагрузке батареи равна

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1320}{110} = 12 \text{ а.}$$

Число параллельно соединенных групп в батарее равно

$$m = \frac{I}{I_{разр}} = \frac{12}{7,5} = 1,6.$$

Следовательно, необходимо взять $m=2$ группы.

Определим число батарей 4НКН-60М в составе каждой группы:

$$n = \frac{U}{U_0} = \frac{110}{5} = 22 \text{ батареи.}$$

Таким образом, общее число батарей типа 4НКН-60М, входящих в рассчитываемую смешанную батарею, равно

$$N = nm = 22 \cdot 2 = 44.$$

Емкость всей батареи

$$Q = mQ_0 = 2 \cdot 60 = 120 \text{ а-ч.}$$

Время работы батареи при полной нагрузке без подзарядки

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{120}{12} = 10 \text{ часов.}$$

§ 200. АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

В современной электротехнической практике применяются самые разнообразные типы аккумуляторных батарей, изготавливаемые нашей электропромышленностью. Ниже приведены таблицы основных данных некоторых щелочных и кислотных аккумуляторных батарей.

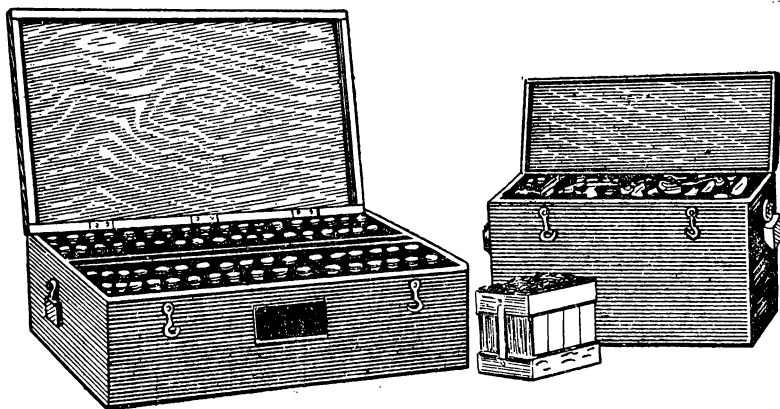


Рис. 438. Батареи щелочных аккумуляторов

В табл. 57 приведены данные некоторых щелочных аккумуляторных батарей, широко применяемых в радиотехнике (рис. 438).

Примечание к табл. 57. Условное обозначение батареи 64АКН-2,25 надо понимать так: 64 — число элементов в батарее, А — анодная, КН — кадмиево-никелевая, 2,25 — емкость батареи 2,25 ампер-часа. Условное обозначение батареи 5НКН-45 надо понимать так: 5 — число элементов в батарее, Н — накальная, КН — кадмиево-никелевая, 45 — емкость батареи 45 ампер-часов.

Если батарейный ящик имеет съемную крышку, то в конце условного обозначения батареи ставится буква М. Например, батарея типа 5НКН-100М имеет съемную крышку.

Таблица 57

Основные данные щелочных аккумуляторных батарей

Тип батарей	Количество элементов в батарее	Номинальное напряжение батарей, в	Номинальная емкость, а-ч	Нормальный зарядный ток, а	Нормальный разрядный ток, а	Размеры, мм			Вес батарей, кг
						длина	ширина	высота	
32АКН-2,25М	32	40	2,25	0,56	0,28	525	165	168	14,2
64АКН-2,25	64	80	2,25	0,56	0,28	525	317	168	28,6
10НКН-22М	10	12,5	22	5,5	2,75	465	148	525	21,0
17НКН-22	17	21,25	22	5,5	2,75	435	285	252	35,0
4НКН-45М	4	5	45	11,25	5,65	305	148	252	14,5
4НКН-45	4	5	45	11,25	5,65	305	148	252	14,0
5НКН-45	5	6,25	45	11,25	5,65	372	148	252	17,0
6НКН-45М	6	7,5	45	11,25	5,65	440	148	252	21,0
7НКН-45	7	8,75	45	11,25	5,65	508	148	252	24,0
8НКН-45М	8	10	45	11,25	5,65	575	148	252	26,6
10НКН-45	10	12,5	45	11,25	5,65	707	152	252	33,5
4НКН-60М	4	5	60	15,0	7,5	262	170	388	23,5
5НКН-60	5	6,25	60	15,0	7,5	315	170	388	29,0
7НКН-60М	7	8,75	60	15,0	7,5	431	170	388	39,0
10НКН-60М	10	12,5	60	15,0	7,5	600	170	388	56,0
4НКН-100М	4	5	100	25	12,5	374	178	388	33,0
5НКН-100М	5	6,25	100	25	12,5	459	178	388	42,5
10НКН-100М	10	12,5	100	25	12,5	884	178	388	82,0
10НКН-100	10	12,5	100	25	12,5	884	178	388	84,0

Таблица 58

Данные кислотных стартерных аккумуляторных батарей

Тип батарей	Количество элементов в батарее	Номинальное напряжение батарей, в	Номинальная емкость, а-ч	Размеры, мм			Вес, кг
				длина	ширина	высота	
6СТЭ-48	6	12	48	293	188	238	32
3СТЭ-112	3	6	112	288	187	227	23,6
3СТМ-112	3	6	112	288	178	238	25,0
3СТП-112	3	6	112	303	182	238	25,0
6СТЭ-128	6	12	128	516	236	242	55,0
6СТЭ-144	6	12	144	525	279	229	59,8
6СТЭ-144	6	12	144	525	307	258	63,4
6СТМ-80	6	12	80	243	187	224	16,0
3СТП-80	3	6	80	251	191	225	16,0
3СТМ-100	3	6	100	266	185	219	19,0
3СТП-100	3	6	100	267	182	218	19,0
3СТЭ-112	3	6	112	287	178	238	21,5
3СТП-112	3	6	112	303	182	238	21,5
3СТЭ-126	3	6	126	326	184	240	24,5
3СТП-126	3	6	126	323	182	238	24,5
3СТП-142	3	6	142	372	182	238	27,5

Примечание. Условное обозначение батарей 3СТП-142 надо понимать так: 3 — число аккумуляторов в батарее, СТ — стартерная батарея, П — моноблок из пластмассы, 142 — емкость батарей в ампер-часах.

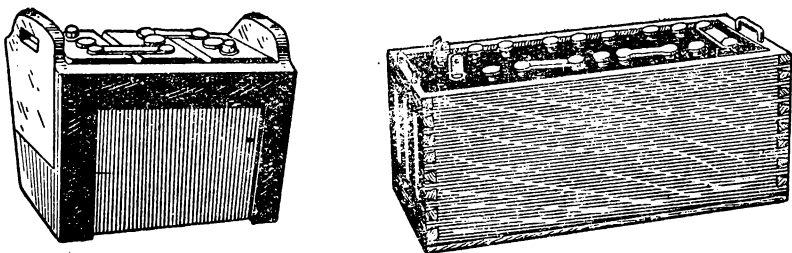


Рис. 439. Батареи кислотных аккумуляторов

В табл. 58 приведены данные некоторых кислотных стартерных аккумуляторных батарей, изготавливаемых нашей электропромышленностью (рис. 439).

§ 201. ЗАРЯД АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Аккумуляторы обычно заряжают от сети постоянного тока или от специальных генераторов постоянного тока, предназначенных для заряда аккумуляторов.

На рис. 440 приведена простейшая схема заряда батареи аккумуляторов от сети постоянного тока. При подключении батареи к сети надо плюс-зажим батареи подключить к плюс-зажиму сети, а минус-зажим батареи — к минус-зажиму сети. Если полярность сети неизвестна, то прежде чем подключать батарею аккумуляторов, надо определить полярность ее при помощи вольтметра магнитоэлектрической системы или каким-либо иным способом.

Для регулирования величины зарядного тока последовательно с аккумуляторной батареей подключают ламповый реостат или ползунковый, рычажный и т. п.

Для наблюдения за режимом заряда аккумуляторной батареи служат амперметр A и вольтметр V .

При расчете регулировочного реостата необходимо знать величину напряжения в сети (на зажимах генератора), от которой заряжается батарея, величину зарядного тока, число аккумуляторов, соединенных последовательно в батарее (в каждой параллельной группе).

Расчет регулировочного сопротивления для заряда щелочных аккумуляторных батарей производится по формуле

$$r_p = \frac{U - 1,4n}{I}, \quad (565)$$

где r_p — сопротивление регулировочного реостата в омах;

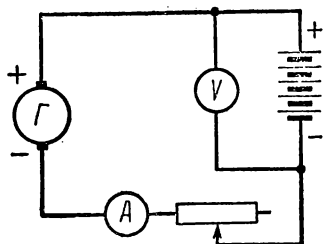


Рис. 440. Простейшая схема заряда батареи аккумуляторов

U — напряжение источника электрической энергии (сети) в вольтах;

n — число аккумуляторов, соединенных последовательно в батарее (в каждой параллельной группе);

1,4 — величина напряжения в вольтах на зажимах каждого аккумулятора в начале его заряда.

Пример 214. Пять аккумуляторных батарей типа 4НКН-60, соединенных последовательно, заряжаются от источника электрической энергии постоянного тока, номинальное напряжение которого $U = 36$ в и номинальный ток $I = 25$ а. Определить сопротивление регулировочного реостата, соединенного последовательно с заряженными аккумуляторными батареями.

Решение. Так как в каждой батарее типа 4НКН-60 имеется по четыре аккумулятора, соединенных последовательно, то в пяти батареях, соединенных последовательно, имеется

$$n = 5 \cdot 4 = 20 \text{ аккумуляторов.}$$

Нормальная величина зарядного тока равна емкости аккумуляторной батареи, разделенной на 4:

$$I_{\text{зар}} = \frac{Q}{4} = \frac{60}{4} = 15 \text{ а.}$$

Сопротивление регулировочного реостата найдем по формуле

$$r_p = \frac{U - 1,4n}{I_{\text{зар}}} = \frac{36 - 1,4 \cdot 20}{15} = 0,533 \text{ ом.}$$

Следовательно, для аккумуляторной батареи необходим реостат с сопротивлением не менее 0,533 ом, рассчитанный на ток не менее 15 а.

Пример 215. Требуется зарядить три аккумуляторные батареи типа 64АКН-2,25 от источника электрической энергии постоянного тока с номинальным напряжением $U = 120$ в. Определить способ подключения батарей на заряд и величину сопротивления регулировочного реостата.

Решение. Число аккумуляторов, которое при заряде может быть включено последовательно, равно напряжению U на зажимах источника электрической энергии, деленному на максимальное напряжение на зажимах каждого аккумулятора при заряде, т. е. на 1,8.

Следовательно,

$$n = \frac{U}{1,8} = \frac{120}{1,8} = 66 \text{ аккумуляторов.}$$

В батарее 64АКН-2,25 последовательно соединено 64 аккумулятора. Следовательно, в каждой параллельной группе общей батареи можно иметь только одну батарею типа 64АКН-2,25.

Поэтому предназначенные для заряда три батареи следует соединить в три параллельно соединенные группы, так что в каждой группе будет по одной батарее типа 64АКН-2,25, или, иначе сказать, по 64 последовательно соединенных аккумулятора.

Нормальный зарядный ток в каждом аккумуляторе или батарее типа 64АКН-2,25 равен

$$I_{\text{зар}} = \frac{Q}{4} = \frac{2,25}{4} = 0,56 \text{ а.}$$

Зарядный ток в цепи

$$I_{\text{зар}} = 3I_{\text{зар}} = 3 \cdot 0,56 = 1,68 \text{ а.}$$

Следовательно, ток, проходящий через регулировочный реостат, равен 1,68 а.

Сопротивление реостата

$$r_p = \frac{U - 1,4n}{I_{зар}} = \frac{120 - 1,4 \cdot 64}{1,68} = 18,1 \text{ ом.}$$

Значит, для заряда аккумуляторных батарей необходимо иметь реостат с сопротивлением не менее 18,1 ом, рассчитанный на ток не менее 1,68 а.

§ 202. БАТАРЕИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Батареи сухих элементов типа БАС

В радиотехнике для питания анодных цепей широко применяются батареи сухих элементов типа БАС. (батарея анодная сухая).

На рис. 441 показана батарея БАС-80-Л-0,9, состоящая из 60 последовательно соединенных сухих стаканчиковой конструкции элементов. Она имеет начальную электродвижущую силу

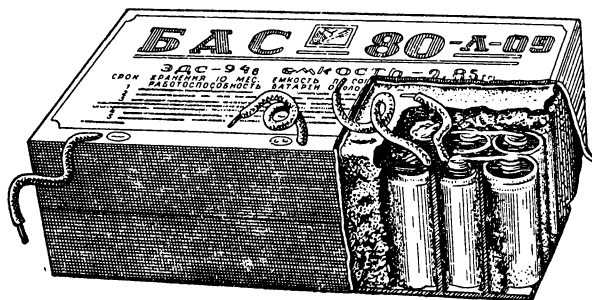


Рис. 441. Батарея сухих элементов типа БАС-80-Л-0,9

92 в, конечное напряжение 60 в, начальную емкость 0,85 а-ч при величине разрядного тока не более 0,015 а и емкость в конце срока хранения (после 10-месячного хранения), равную 0,65 а-ч.

Батарея БАС-80 обычно имеет 4 вывода: вывод от минусового зажима батареи (—), вывод +60 в, вывод +80 в и вывод +90 в. В соответствии с этим от батареи можно брать три напряжения: 60, 80 и 90 в.

Помимо батарей БАС-80, широко применяются батареи БАС-60. Они состоят из 40 последовательно соединенных сухих гальванических элементов стаканчиковой конструкции, размеры которых примерно в 1,5 раза меньше, чем размеры элементов для батареи БАС-80.

Широкое применение в практике находят также батареи типа БАС-Г. Это сухая анодная батарея галетной конструкции.

В табл. 59 приведены основные данные некоторых батарей типа БАС.

Таблица 59

Условное обозначение батарей элементов	Начальная Э.д.с., в	Начальное напряжение, в	Начальная емкость, а-ч	Конечное напряжение, в	Сохран- ность, месяц	Емкость в конце срока хранения, а-ч
БАС-60-Х-0,5	70	68	0,5	40	10	0,3
БАС-60-Х-0,7	74	71	0,7	57	12	0,5
БАС-80-Л-0,9	94	92	0,85	60	10	0,65
БАС-80-Х-1,0	104	102	1,05	60	15	0,7
БАС-Г-60-Л-1,3	74	71	1,3	40	12	0,95
БАС-Г-80-Л-0,8	96	95	0,8	60	12	0,6
БАС-Г-80-Л-1-2,1	104	102	2,1	60	15	1,5
БАС-Г-120-Л-0,27	127	120	0,27	56	6	0,2
БАС-Г-160-Л-0,35	170	160	0,35	100	6	0,24

§ 203. АНОДНЫЕ БАТАРЕИ ГАЛЕТНО-ПЛЕНОЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

За последние годы в технике связи широкое применение нашли батареи сухих элементов галетно-плёночной конструкции.

На рис. 442 показан в разрезе один из элементов галетно-плёночной конструкции.

Отрицательным электродом в этом элементе служит цинковая пластина 1. На ее наружную поверхность нанесен специальный

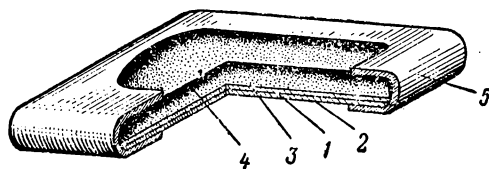


Рис. 442. Элемент галетно-плёночной конструкции:

1 — цинковая пластина; 2 — электропроводящий слой;
3 — картонная диафрагма; 4 — агломерат; 5 — кольцо

электропроводящий слой 2, непроницаемый для влаги и электролита. Назначение его — создавать надежный контакт с соседним однотипным элементом при последовательном соединении их в батарею. Так как электропроводящий слой не пропускает через себя электролит, то этим самым он предотвращает переход его из одного элемента в другой, что нарушило бы нормальную работу элемента. Цинковая пластина 1 другой своей поверхностью плотно соприкасается с картонной диафрагмой 3, пропитанной обычно электролитом, применяемым в марганцово-цинковом элементе. Затем идет слой 4, состоящий из механической

прессованной смеси двуокиси марганца MnO_2 и графита (агломерат), играющий роль положительного электрода в элементе. Агломерат отделен от картонной диафрагмы 3 тонкой бумагой, предохраняющей элемент от попадания частиц агломерата на цинковую пластину.

Все составные части галетно-пленочного элемента спрессованы и скреплены пленочным хлорвиниловым кольцом 5. Благодаря своей эластичности хлорвиниловое кольцо плотно облегает со всех сторон элемент, надежно изолируя его по боковой поверхности. Торцовые поверхности каждого элемента остаются обнаженными, причем одна из них — это электропроводящий слой 2 на цинковой пластине, а другая — поверхность положительного электрода 4.

При составлении батареи последовательно соединенных галетно-пленочных элементов последние накладываются друг на друга с таким расчетом, чтобы положительный электрод 4 одного элемента был плотно наложен на электропроводящий слой 2 другого элемента. В результате наложения элементов друг на друга разноименными полюсами образуется столбик элементов, который обычно называется блоком галетно-пленочных элементов.

Собранный блок галетно-пленочных элементов стягивают бандажами, покрывают по боковой поверхности парафином и затем заделывают парафинированной бумагой.

Изолирующая хлорвиниловая пленка элементов, толщина которой примерно равна 0,2 мм, обладает свойством пропускать через себя газы, образующиеся в нем в процессе работы. Благодаря этому в элементе можно обойтись без газовой камеры и газоотводной трубки, что уменьшает размеры, вес элемента и упрощает его конструкцию.

Основное преимущество батареи галетно-пленочной конструкции — это получение относительно большой емкости (до 1,3 а-ч) при малых размерах батарей. Существенный недостаток батарей галетно-пленочной конструкции — их более высокое внутреннее сопротивление по сравнению с батареями стаканчикового типа.

ЧАСТЬ ПЯТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

ГЛАВА XXXV

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 204. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Генераторами электрической энергии называют электрические машины, преобразующие механическую энергию в электрическую.

Различают генераторы постоянного и переменного тока. Первые предназначены для питания потребителей электрической энергии постоянным током, а вторые — переменным.

Генераторы постоянного тока широко применяются в современной электротехнике. Например, в технике сильных токов генераторы постоянного тока используются в трамвайном деле, на электрических железных дорогах и в других специальных электротехнических установках, где переменный ток использовать нельзя.

В технике связи генераторы постоянного тока играют исключительно большую роль. Например, зарядные генераторы постоянного тока заряжают аккумуляторные батареи, обслуживающие аппаратуру проводной и беспроводной техники связи; радиогенераторы постоянного тока непосредственно питают цепи накала и анодные цепи мощных радиостанций; умформеры преобразуют постоянный ток низкого напряжения в постоянный ток высокого напряжения для питания специальных радиостанций, например автомобильного типа и др.

Наша промышленность полностью освоила серийное производство генераторов постоянного тока, начиная с машин очень большой мощности, применяемых в технике сильных токов, и кончая маломощными генераторами, применяемыми в специальных установках техники связи.

§ 205. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Работа генераторов постоянного тока основана на принципе электромагнитной индукции.

Допустим, что контур $abcd$ вращается с равномерной угловой скоростью в двухполюсном магнитном поле (рис. 443) и в результате этого в нем индуцируется синусоидальная электродвижущая сила.

Концы активных сторон ab и cd контура присоединены соответственно к кольцам 1 и 2, которые вместе с контуром вращаются вокруг их общей оси OO_1 . С помощью щеток 3 и 4, наложенных на кольца, контур соединен с потребителем электрической энергии, имеющим сопротивление R .

Синусоидальная электродвижущая сила, индуцированная в контуре, создает в потребителе переменный синусоидальный

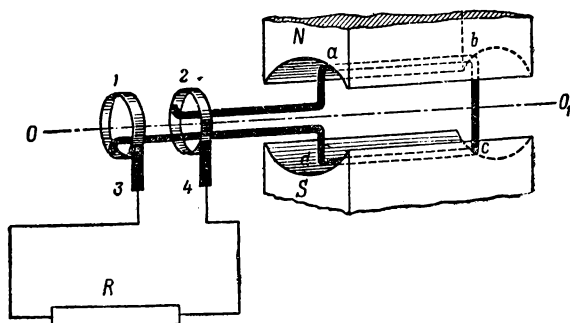


Рис. 443. С помощью двух металлических колец 1 и 2 и щеток 3 и 4 рамка соединена с внешней цепью

ток. Этот ток, проходя через потребитель, выделяет в его сопротивлении R тепло за счет электрической энергии, передаваемой контуром этому потребителю. В самом же контуре электрическая энергия создается в результате преобразования механической энергии «первичного двигателя», вращающего этот контур в магнитном поле.

Рассмотренное нами электрическое устройство, состоящее из контура, вращающегося во внешнем магнитном поле, является принципиально простейшим генератором переменного синусоидального тока.

Чтобы такой генератор мог давать во внешнюю цепь выпрямленное напряжение, необходимо заменить в нем систему контактных колец особым выпрямляющим приспособлением — коллектором.

Допустим, что контур $abcd$ (рис. 444) вращается в магнитном поле и в нем индуцируется синусоидальная электродвижущая сила. Однако активные стороны ab и cd контура теперь присоединены не к двум контактным кольцам, а к двум полукольцам 1 и 2. С помощью щеток 3 и 4, наложенных на эти полукольца, контур соединен с потребителем, имеющим сопротивление R .

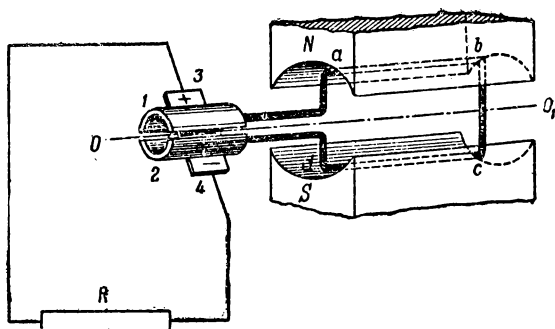


Рис. 444. Два изолированных полукольца 1 и 2 спрямляют переменный ток

При вращении контура вместе с ним вращаются и полукольца вокруг их общей оси OO_1 . Так как щетки неподвижны, то они попеременно соприкасаются то с одним, то с другим полукольцом. Этот «обмен» полукольцами происходит в момент, когда синусоидальная электродвижущая сила в контуре переходит через свое нулевое значение. В результате каждая щетка все

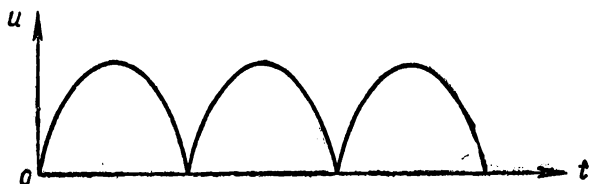


Рис. 445. Пульсирующее напряжение

время сохраняет свою полярность неизменной: в данном случае щетка 3 все время имеет положительную полярность, а щетка 4 — отрицательную.

Следовательно, если на полукольцах 1 и 2 имеется некоторое синусоидальное напряжение, то на щетках 3 и 4 оно уже становится выпрямленным и в данном случае пульсирующим (рис. 445).

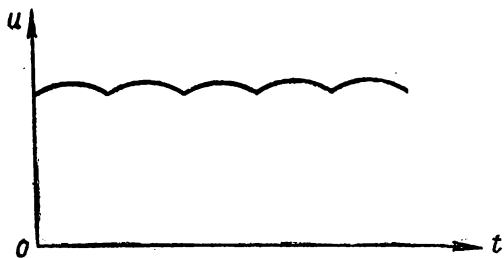


Рис. 446. Напряжение, выпрямленное с помощью коллектора

Итак, с помощью простейшего коллектора, состоящего из двух полуколец (двух коллекторных пластин), можно на зажимах (щетках) простейшего генератора переменного си-

нусоидального тока получить выпрямленное (пульсирующее) напряжение. Чтобы уменьшить пульсацию выпрямленного напряжения, в генераторах постоянного тока применяют коллектор с большим числом коллекторных пластин, а одиночный контур заменяют совокупностью контуров. Чем больше имеет коллектор пластин, тем больше приближается выпрямленное пульсирующее напряжение к постоянному (рис. 446).

§ 206. ОСНОВНЫЕ ЧАСТИ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рис. 447 представлена принципиальная схема четырехполюсного генератора постоянного тока. Здесь показаны следующие основные части генератора: ярмо 1, электромагниты 2 и якорь 3.

Ярмо генератора 1 — это его остов. К ярму прикреплены сердечники электромагнитов и крышки с подшипниками, на которых покоится вал генератора. Так как ярмо входит в магнитную цепь генератора, то оно изготавливается из ферромагнитного материала, например из литой стали.

Электромагниты генератора (рис. 448) состоят из сердечников 1 с насаженными на них катушками 2 с медной изолированной проволокой, называемыми катушками возбуждения.

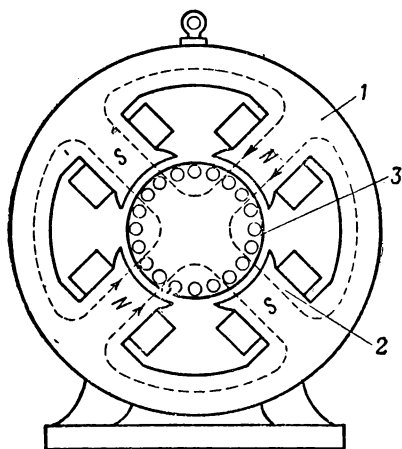


Рис. 447. Принципиальная схема четырехполюсного генератора постоянного тока

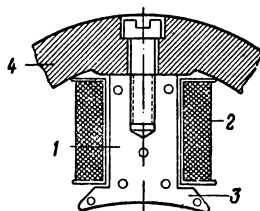


Рис. 448. Электромагнит генератора

Сердечники электромагнитов изготавливаются обычно из листовой электротехнической стали. Они прикрепляются к ярму генератора болтами (рис. 448).

Чтобы придать магнитным линиям в воздушных зазорах необходимое направление, сердечники электромагнитов снабжаются наконечниками, называемыми полюсными башмаками.

Электромагниты, питаемые постоянным током, создают в генераторе магнитное поле, магнитные линии которого показаны на рис. 447 пунктирными линиями.

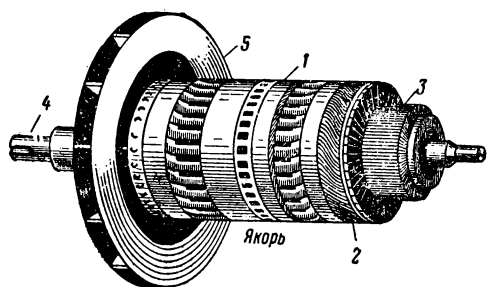


Рис. 449. Якорь генератора:
1 — сердечник; 2 — обмотка; 3 — коллектор; 4 — вал;
5 — вентилятор

генератора. Постоянный ток, протекающий по обмоткам электромагнитов, имеет в них такое направление, что любые два соседние сердечника электромагнита имеют разноименную полярность (см. рис. 447).

Якорь генератора постоянного тока (рис. 449) состоит из сердечника с нанесенной на него обмоткой.

Так как якорь генератора является одним из участков магнитной цепи, то его сердечник обычно изготавливается из ферромагнитного материала, например из электротехнической стали.

Во избежание потерь на вихревые токи сердечник якоря собирается из отдельных листов стали, имеющих зубчатую форму (рис. 450).

Во впадины собранного сердечника якоря укладывается якорная обмотка, изготовленная из изолированной проволоки (для маломощных генераторов) или из медных полос прямоугольной формы, сделанных на специальных шаблонах (для генераторов относительно большой мощности).

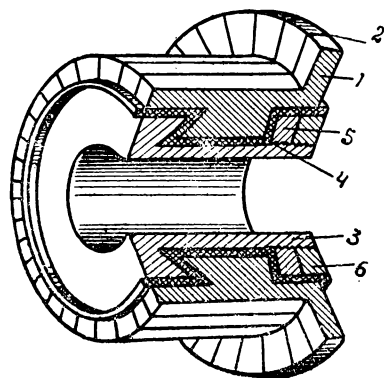


Рис. 451. Коллектор

Каждая катушка электромагнита (катушка возбуждения) состоит из витков медной изолированной проволоки или медной ленты, намотанных на каркас из жести, картона или какого-нибудь иного материала.

Обмотки катушек возбуждения соединены друг с другом последовательно и совместно образуют обмотку возбуждения генератора.

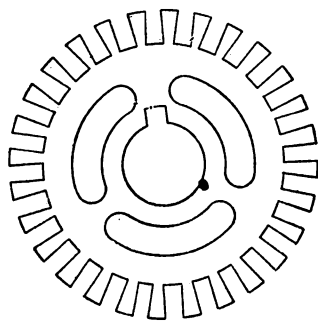


Рис. 450. Стальной лист сердечника якоря

Якорная обмотка прочно закрепляется на сердечнике якоря бандажными или клиньями, чтобы она не выпадала из пазов сердечника под влиянием центробежной силы.

Коллектор (рис. 451) представляет собой совокупность коллекторных пластин 1 из твердотянутой меди.

Коллекторные пластины изолированы друг от друга прессованной слюдой 2 (миканитом), имеющей практически одинаковую изнашиваемость с медью коллекторных пластин при трении о них щеток генератора.

В нижней своей части коллекторные пластины имеют очертание, напоминающее ласточкин хвост. Этой своей частью пластины помещены в соответствующие их форме вырезы коллекторной втулки 3. Коллекторные пластины изолированы миканитом 4 от коллекторной втулки 3, от нажимной шайбы 5 и от нажимной гайки 6.

Собранный коллектор закреплен нажимной гайкой 6, навинчиваемой на коллекторную втулку 3.

Коллектор насаживается на вал генератора, где его пластины соединяются с якорной обмоткой генератора (рис. 449).

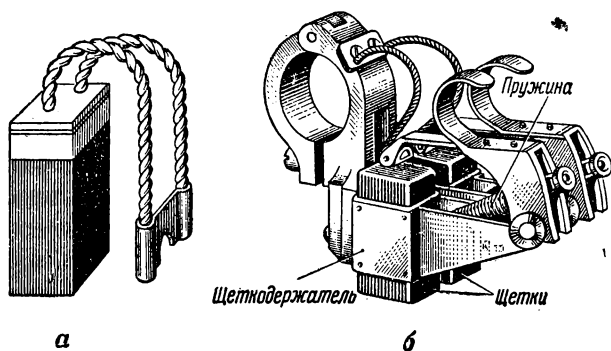


Рис. 452. Щеткодержатель со щеткой

Щетки. На коллектор наложены угольные или металлические щетки, при помощи которых генератор электрически соединяется с внешней цепью.

Минимальное число щеток, которое может иметь генератор постоянного тока, равно двум: одна служит положительным полюсом генератора (положительная щетка), другая — отрицательным (отрицательная щетка). В многополюсных генераторах постоянного тока число пар щеток обычно равно числу пар полюсов, что обеспечивает лучшую работу генератора. Одноименные щетки генераторов имеют одинаковые потенциалы и связаны электрически друг с другом соединительными проводниками.

Ширину щеток обычно выбирают так, чтобы щетка одновременно перекрывала две — три ламели коллектора. Это необходимо для того, чтобы по возможности предотвратить искрение на коллекторе под щетками при работе машины.

Щетки *a* закреплены в щеткодержателе *б* (рис. 452). При помощи пружин щеткодержателя щетки своей вогнутой поверхностью плотно прижимаются к цилиндрической поверхности

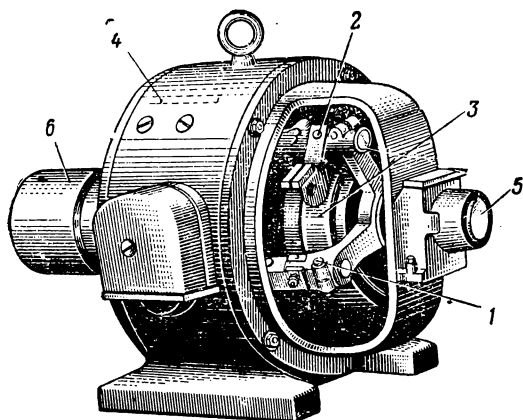


Рис. 453. Генератор постоянного тока

коллектора. Щеткодержатель своим отверстием посажен на стержень траверсы, поворотом которой достигается необходимая установка щеток генератора на коллекторе.

На рис. 453 показан внешний вид генератора постоянного тока; здесь можно видеть траверсу 1, щеткодержатель 2, коллектор 3, станину 4, подшипник 5 и маховик 6.

§ 207. ОБМОТКИ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Якорная обмотка генератора уложена в пазы сердечника якоря. В зависимости от мощности генератора обмотку якоря выполняют или в виде медных изолированных стержней, соединенных последовательно друг с другом в том или ином порядке, или из отдельных готовых катушек, изготовленных по шаблону и уложенных в пазы сердечника якоря, или же путем намотки вручную изолированной медной проволокой.

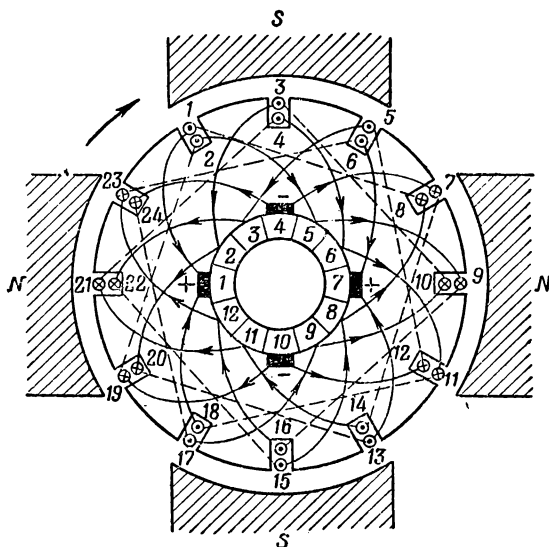


Рис. 454. Схема волновой обмотки четырехполюсного генератора постоянного тока

Обмотка наносится на сердечник якоря так, что каждые два активных проводника, соединенных непосредственно и последовательно друг с другом, лежат под разными магнитными полюсами. Расстояние между этими проводниками по поверхности якоря может быть различным и в частном случае может быть равным полюсному делению, т. е. расстоянию между серединами двух соседних разноименных полюсов по окружности якоря.

Обмотка называется **волновой**, если она наносится на сердечник якоря так, что провод проходит поочередно под всеми полюсами машины и возвращается к исходному полюсу. На рис. 454 схематически показан четырехполюсный генератор с волновой обмоткой, разрезанной плоскостью чертежа перпендикулярно оси якоря. Здесь мы видим 12 пазов в якоре, в которых уложено 24 активных провода якорной обмотки. Передние (обращенные к нам) концы активных проводников при помощи соединительных проводов (сплошные линии на рисунке) присоединены к ламелям коллектора: проводник 3 — к ламели 2, проводник 5 — к ламели 3 и т. д. Другие концы (задние) активных проводников соединены друг с другом попарно (пунктирные линии на рисунке): проводник 1 — с проводником 8, проводник 7 — с проводником 14 и т. д. Если, например, начать движение по обмотке от проводника 2, находящегося под южным полюсом, расположенным вверху, то отсюда через ламель 5 коллектора попадем в проводник 9, находящийся под северным полюсом, расположенным справа, оттуда по соединительному проводу — в проводник 16, находящийся под нижним южным полюсом, затем через ламель 12 коллектора к проводнику 23, находящемуся под левым северным полюсом, далее по соединительному проводу — к проводнику 6, находящемуся под верхним южным полюсом, и т. д. Обходя таким образом последовательно всю обмотку, придем к исходному проводнику 2. По числу полюсов в машине имеются щетки, под которые поочередно набегают одна за другой ламели коллектора при вращении якоря. Положительные и отрицательные щетки расположены поочередно по окружности коллектора. На рис. 455 дана схема этой же волновой обмотки в развернутом виде. Якорь показан разрезанным по одной из образующих его цилиндрических поверхностей и затем развернутым на плоскости. Активные проводники изображены в виде ряда параллельно расположенных линий, пронумерованных от 1 до 24. Коллектор показан на рис. 455 внизу в виде длинной узкой ленты, разделенной на 12 ламелей.

Ламели 1 и 7 контактируют с положительными щетками, а ламели 4 и 10 — с отрицательными. Это значит, что в следующий момент времени положительные щетки будут контактировать с ламелями 12 и 6, а отрицательные — с ламелями 3 и 9 и т. д. Положительные щетки устанавливаются с таким расчетом, чтобы ток из якорной обмотки все время поступал через них во

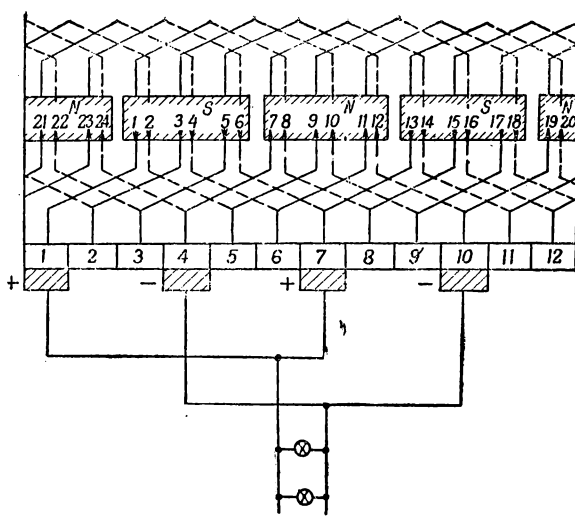


Рис. 455. Схема волновой обмотки четырехполюсного генератора в развернутом виде

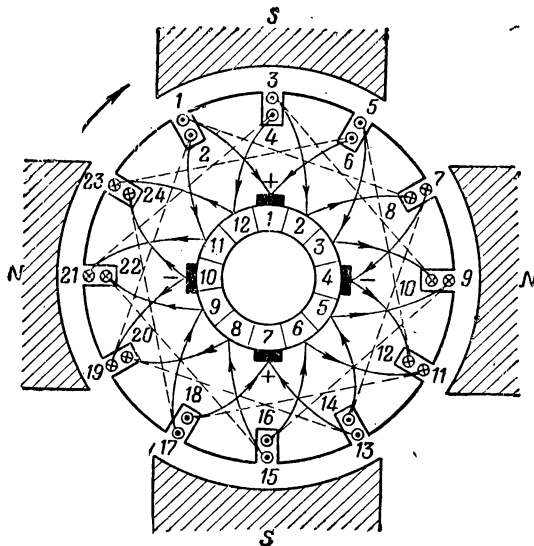


Рис. 456. Схема петлевой обмотки четырехполюсного генератора постоянного тока

внешнюю цепь и через отрицательные щетки возвращается в якорную обмотку. На рис. 455 показана схема внешней цепи, подключенной к щеткам генератора (группа параллельно соединенных электрических лампочек).

Обмотка называется **петлевой**, если она на сердечник якоря наносится так, что провод, пройдя, например, под северным полюсом, а затем и под соседним южным полюсом, возвращается под прежний северный полюс. На рис. 456 приведена схема четырехполюсного генератора с петлевой обмоткой, разрезанной плоскостью чертежа, перпендикулярной оси якоря. Если, например, начать обход обмотки с проводника 1, расположенного под

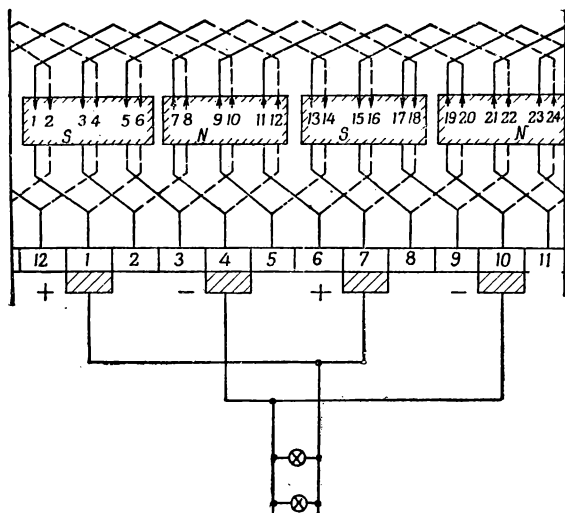


Рис. 457. Схема петлевой обмотки четырехполюсного генератора в развернутом виде

верхним южным полюсом, то от него по соединительному проводу (пунктирная линия) попадем в проводник 8, находящийся под правым северным полюсом, отсюда через ламель 2 коллектора к проводнику 3, находящемуся под верхним южным полюсом, а от него по соединительному проводу к проводнику 10, находящемуся под правым северным полюсом, и т. д. На рис. 457 показана схема петлевой обмотки в развернутом виде.

В нашу задачу не входит подробное рассмотрение всех типов обмоток, их конструктивного выполнения и расчета, а поэтому мы ограничимся вышеизложенным кратким описанием наиболее типичных форм обмоток — волновой и петлевой. Подробное изложение теории обмоток можно найти в специальных учебниках по теории электрических генераторов постоянного тока.

§ 208. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ

Если генератор постоянного тока не нагружен током (холодной ход генератора), то магнитное поле, создаваемое током электромагнитов генератора, симметрично относительно оси полюсов $O = O$ и геометрической нейтрали $O_1 = O_1$ (рис. 458).

Если же генератор нагружен, то через его якорную обмотку протекает ток, который создает свое собственное магнитное поле

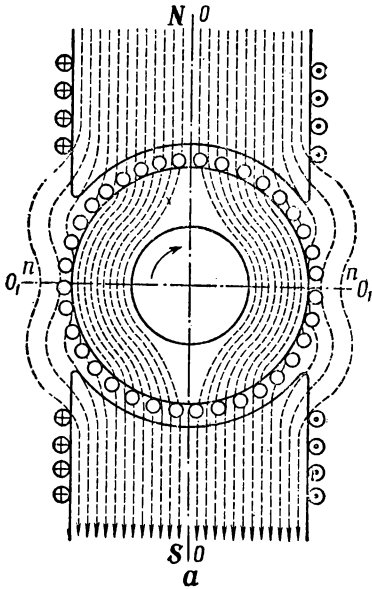


Рис. 458. Магнитное поле, создаваемое электромагнитами генератора

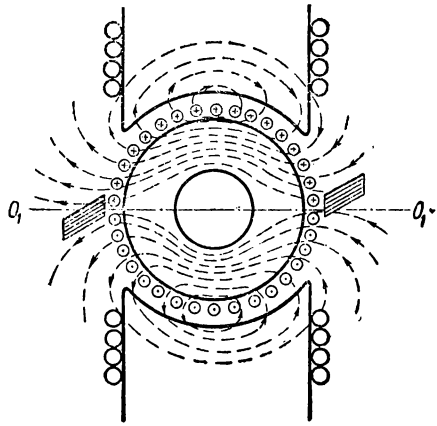


Рис. 459. Магнитное поле тока якоря

(рис. 459). Направление этого поля можно определить по правилу буравчика.

Магнитное поле тока электромагнитов и магнитные поля тока якорной обмотки накладываются друг на друга и совместно образуют результирующее магнитное поле (рис. 460).

Нетрудно видеть, что там, где якорь при своем вращении набегаёт на полюс электромагнита, результирующее поле слабее, чем там, где якорь сбегает с полюса электромагнита. Это объясняется тем, что в первом случае основное магнитное поле, создаваемое током электромагнита, и магнитное поле тока якорной обмотки имеют различные направления, а во втором случае — одинаковые. При отсутствии магнитного насыщения в стали генератора можно считать, что насколько основное поле уменьшилось с одной стороны полюса, настолько оно возросло

с другой. Следовательно, результирующий магнитный поток не изменился по величине.

Однако по конфигурации результирующий магнитный поток значительно отличается от основного, создаваемого током электромагнитов. В частности, изменилось распределение плотности магнитного потока в воздушном зазоре. Вследствие этого так называемая физическая нейтраль $n = n$ генератора расположена под углом β к геометрической нейтрали $O_1 = O_1$ в сторону вращения якоря генератора.

Чем больше нагружен генератор и чем больше магнитное насыщение его стали, тем сильнее проявляется реакция якоря, так как в этом случае происходит не только искажение магнитного потока генератора, но и некоторое уменьшение его.

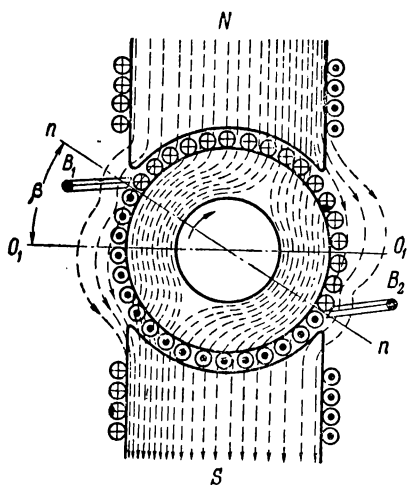


Рис. 460. Результирующее магнитное поле генератора

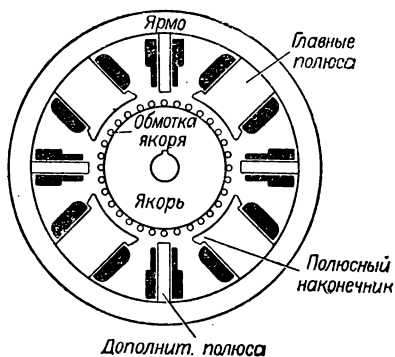


Рис. 461. Схема генератора с дополнительными полюсами

Реакция якоря оказывает вредное влияние на режим работы генератора, вызывая уменьшение его электродвижущей силы и искрение под щетками на коллекторе.

Основными мерами борьбы с реакцией якоря являются: 1) применение в генераторах дополнительных полюсов (рис. 461), компенсирующих магнитное поле тока якорной обмотки, и 2) сдвиг щеток с геометрической нейтрали $O_1 = O_1$ на физическую нейтраль $n = n$ (рис. 460), на некоторый угол β в сторону вращения якоря генератора, что предупреждает искрение под щетками на коллекторе.

§ 209. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Допустим, что в двухполюсном магнитном поле, магнитный поток которого равен Φ , вращается якорь генератора с постоянным числом оборотов n . Число всех активных проводников якоря, т. е. таких, которые расположены на цилиндрической поверхности якоря и при движении последнего пересекают магнитный поток, равно z .

Среднее значение индуцированной электродвижущей силы в каждом из активных проводников якоря численно равно магнитному потоку, пересекаемому этим проводником за одну секунду. За один оборот якоря каждый из активных проводников пробежит под северным и под южным полюсами, т. е. он пересечет магнитный поток 2Φ . Если якорь совершает n оборотов в минуту, то в одну секунду он совершит $\frac{n}{60}$ оборотов.

Следовательно, среднее значение индуцированной электродвижущей силы в каждом из активных проводников якоря ,

$$E = \frac{n}{60} \cdot 2\Phi,$$

где n — число оборотов якоря в минуту;

Φ — магнитный поток полюсов в Вольт-секундах;

E — индуцированная электродвижущая сила в вольтах.

Активные проводники якоря генератора соединены последовательно друг с другом, а поэтому индуцированная электродвижущая сила в них складывается. В двухполюсной машине имеется пара параллельных ветвей якорной обмотки, а поэтому средняя величина индуцированной электродвижущей силы в якорной обмотке равна

$$E = \frac{n}{60} \cdot 2\Phi \frac{z}{2},$$

или

$$E = z\Phi \frac{n}{60}, \tag{566}$$

где z — число всех активных проводников на якоре генератора.

Из формулы (566) следует, что средняя величина индуцированной электродвижущей силы в генераторе прямо пропорциональна величине магнитного потока Φ , числу оборотов якоря n в минуту и числу z активных проводников якоря.

Если многополюсный генератор имеет, например, $2p$ полюсов и якорная обмотка его состоит из $2a$ параллельных ветвей, то средняя величина индуцированной электродвижущей силы генератора равна

$$E = \frac{n}{60} \Phi \frac{z}{2a} \cdot 2p,$$

или, иначе,

$$E = \frac{p}{a} z\Phi \frac{n}{60}. \quad (567)$$

Пример 216. Определить электродвижущую силу генератора, имеющего одну пару полюсов ($p = 1$) и одну пару параллельных ветвей ($a = 1$) якорной обмотки. Число активных проводников якоря $z = 192$, число оборотов якоря 750 об/мин и величина магнитного потока $\Phi = 0,05$ в-сек.

Решение. По формуле (567) находим

$$E = \frac{p}{a} z\Phi \frac{n}{60} = \frac{1}{1} \cdot 192 \cdot 0,05 \cdot \frac{750}{60} = 120 \text{ в.}$$

§ 210. МОЩНОСТЬ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Полная электрическая мощность, развиваемая генератором постоянного тока, равна произведению электродвижущей силы E генератора на величину полного тока I_a его якорной обмотки:

$$P = EI_a.$$

Если поддерживать электродвижущую силу генератора постоянной, то полная электрическая мощность его будет пропорциональна току I_a . Согласно формуле (567) электродвижущая сила генератора

$$E = \frac{p}{a} z\Phi \frac{n}{60}.$$

А это значит, что при прочих равных условиях полная электрическая мощность генератора растет с увеличением числа оборотов его якоря и увеличением числа полюсов его.

Полезная мощность, отдаваемая генератором во внешнюю цепь, равна произведению напряжения U на зажимах генератора на величину тока I , посылаемого генератором во внешнюю цепь:

$$P_1 = UI,$$

где P_1 — полезная мощность в ваттах;

U — напряжение в вольтах;

I — ток в амперах.

Отношение полезной мощности P_1 к полной мощности P , развиваемой генератором, называется **электрическим коэффициентом полезного действия** η_g генератора:

$$\eta_g = \frac{P_1}{P}, \quad (568)$$

где η_g — коэффициент полезного действия;

P_1 — полезная мощность;

P — полная мощность.

Электрический коэффициент полезного действия (к. п. д.) генератора зависит от его режима работы. Всякий генератор обычно конструируется так, что его к. п. д. максимален при нормальной его нагрузке, а поэтому всегда стремятся генератор загрузить полностью.

Наименьшим к. п. д. генератор обладает при холостом ходе, т. е. когда ток во внешней цепи равен нулю.

Если генератор перегрузить, то его к. п. д. будет уменьшаться из-за резко возрастающих потерь на тепловую энергию в якорной обмотке и ряда побочных явлений, связанных с возросшим якорным током. Мощные генераторы, как правило, обладают значительно большими к. п. д. по сравнению с маломощными. Среднее значение к. п. д. генератора при нормальной нагрузке равно примерно 90%. При уменьшении нагрузки к. п. д. генератора резко падает: например, если генератор заставить работать при $\frac{1}{4}$ его нормальной нагрузки, то к. п. д. генератора снизится примерно до 50%.

Промышленным коэффициентом полезного действия называют отношение полезной мощности, развиваемой генератором, к той механической мощности, которую развивает двигатель на своем валу, вращая якорь генератора:

$$\eta_{\text{пром}} = \frac{P_1}{P},$$

где $\eta_{\text{пром}}$ — промышленный коэффициент полезного действия;
 P_1 — полезная мощность, развиваемая генератором;
 P — механическая мощность, развиваемая первичным двигателем на валу.

Пример 217. Определить промышленный к. п. д. генератора, если первичный двигатель, приводящий его в движение, развивает на своем валу механическую мощность $P = 12$ л. с., а генератор, имеющий на своих зажимах напряжение $U = 120$ в, питает внешнюю цепь током $I = 55,2$ а.

Решение. Механическая мощность, развиваемая первичным двигателем, $P = 12 \cdot 736 = 8832$ вт.

Полезная электрическая мощность, развиваемая генератором,

$$P_1 = UI = 120 \cdot 55,2 = 6624 \text{ вт.}$$

Промышленный к. п. д.

$$\eta_{\text{пром}} = \frac{P_1}{P} = \frac{6624}{8832} = 0,75.$$

Промышленный к. п. д., кроме электрических потерь в генераторе, учитывает все механические и магнитные потери, а поэтому он меньше, чем электрический к. п. д.

§ 211. КЛАССИФИКАЦИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО СПОСОБУ ИХ ВОЗБУЖДЕНИЯ И ПОНЯТИЕ ОБ ИХ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ

Генераторы постоянного тока подразделяются по способу их возбуждения на генераторы с независимым возбуждением и самовозбуждением.

Характерная особенность генераторов с независимым возбуждением — та, что их цепь возбуждения питается постоянным током от постороннего источника электрической энергии. Наоборот, генераторы с самовозбуждением сами питают постоянным током свою цепь возбуждения.

Генераторы постоянного тока с самовозбуждением в свою очередь подразделяются на генераторы с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

Генератор с параллельным возбуждением имеет обмотку возбуждения, подключенную параллельно к якорной обмотке.

Генератор с последовательным возбуждением имеет обмотку возбуждения, подключенную последовательно с якорной обмоткой.

Генератор со смешанным возбуждением имеет две обмотки возбуждения, из которых одна подключена параллельно, а другая — последовательно с якорной обмоткой.

Основными величинами, характеризующими работу генераторов постоянного тока, являются: электродвижущая сила E , напряжение на зажимах U , нагрузка (ток, даваемый генератором потребителю) I , ток возбуждения i_v и номинальное число оборотов n якоря генератора в минуту.

Однако весьма важно бывает знать не только основные величины, характеризующие работу генератора, но и зависимость их друг от друга.

Зависимость между какими-либо двумя основными величинами, характеризующими работу генератора, называется характеристикой генератора.

Характеристики генератора обычно изображаются графически в виде некоторых кривых.

Важнейшие характеристики генератора постоянного тока следующие: 1) характеристика холостого хода, 2) внешняя характеристика и 3) регулировочная характеристика.

Характеристика холостого хода генератора выражает зависимость его электродвижущей силы E от тока возбуждения i_v при постоянстве числа оборотов якоря генератора в минуту ($n = \text{const}$) и нагрузке, равной нулю ($I = 0$).

Внешняя характеристика генератора постоянного тока выражает зависимость напряжения U на зажимах генератора от его нагрузки I при $n = \text{const}$ и постоянном сопротивлении цепи возбуждения ($r_v = \text{const}$).

Регулировочная характеристика генератора постоянного тока выражает зависимость тока возбуждения i_b от нагрузки I генератора при постоянстве напряжения ($U = \text{const}$) на зажимах генератора и при $n = \text{const}$.

В последующих параграфах мы рассмотрим характеристики основных типов генераторов постоянного тока.

§ 212. ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

На рис. 462 показана принципиальная схема генератора постоянного тока с независимым возбуждением с подключенным к нему потребителем.

Обмотка возбуждения генератора не связана электрически с его якорной обмоткой. Она питается током i_b от постороннего источника электрической энергии, например от аккумуляторной батареи. Последовательно с обмоткой возбуждения, имеющей сопротивление r_m , подключен регулировочный реостат r_b , называемый реостатом возбуждения. Он изменяет величину тока возбуждения i_b в цепи и тем самым регулирует электродвижущую силу E генератора.

К щеткам (+) и (-) генератора подведены соединительные провода, связывающие генератор с потребителем, например с электрическими лампочками.

Амперметр A и вольтметр V дают возможность наблюдать соответственно за нагрузкой I генератора и напряжением U на его зажимах.

Характеристика холостого хода генератора. Характеристикой холостого хода генератора называют зависимость электродвижущей силы E генератора от тока возбуждения i_b при постоянстве числа оборотов n якоря в минуту и нагрузке генератора, равной нулю ($I = 0$).

Для снятия характеристики холостого хода генератора необходимо отсоединить его от внешней цепи и затем сообщить его якорю номинальное число оборотов n_n в минуту. Затем, изменяя с помощью реостата возбуждения r_b ток возбуждения i_b генератора, можно снять кривую зависимости электродвижущей силы E от тока возбуждения i_b .

Вольтметр, включенный в данную цепь (рис. 462), покажет напряжение на зажимах генератора. Но так как ток I в якоря генератора при холостом ходе равен нулю, то напря-

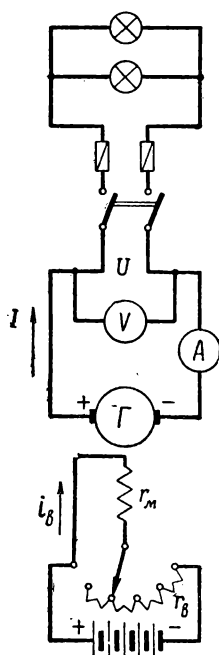


Рис. 462. Принципиальная схема генератора постоянного тока с независимым возбуждением

жение на зажимах генератора в этом случае должно быть равно электродвижущей силе E генератора, т. е.

$$U_{x. x} = E,$$

где $U_{x. x}$ — напряжение холостого хода на зажимах генератора.

На рис. 463 показана характеристика холостого хода генератора постоянного тока с независимым возбуждением.

Здесь мы видим, что при токе возбуждения, равном нулю ($i_b = 0$), электродвижущая сила генератора не равна нулю, она составляет несколько процентов номинального значения электродвижущей силы генератора. Эта электродвижущая сила, называемая начальной или остаточной электродвижущей силой, обусловлена наличием остаточного магнетизма в магнитной цепи генератора. При вращении якоря генератора в магнитном поле остаточного магнетизма в якорной обмотке индуцируется начальная (остаточная) электродвижущая сила $E_{ост}$. Затем по мере увеличения тока возбуждения i_b генератора электродвижущая сила растет, изменяясь согласно кривой, напоминающей кривую намагничивания ферромагнитных материалов.

Электродвижущая сила E генератора вначале растет весьма быстро (прямолинейный участок ab характеристики), изменяясь по линейному закону. Это объясняется тем, что при малых величинах тока возбуждения сталь генератора весьма слабо намагничена, ее магнитное сопротивление мало из-за относительно большой магнитной проницаемости стали. Ампер-витки обмотки возбуждения генератора в этом случае расходуются главным образом в воздушном зазоре магнитной цепи генератора (примерно 80% всех ампер-витков). В силу этого между магнитным потоком Φ генератора и током возбуждения i_b существует линейная зависимость. А так как электродвижущая сила E генератора при постоянстве числа оборотов его якоря в минуту ($n = \text{const}$) пропорциональна величине магнитного потока:

$$E = Cn\Phi,$$

то электродвижущая сила E генератора при малых токах возбуждения i_b изменяется пропорционально величине тока.

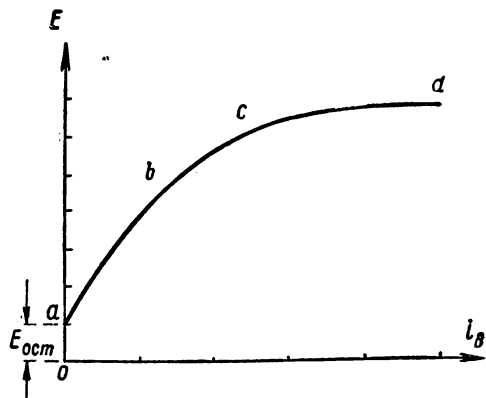


Рис. 463. Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением

Однако при дальнейшем увеличении тока возбуждения i_b линейная зависимость между ним и электродвижущей силой E генератора нарушается. Дело в том, что по мере возрастания тока возбуждения начинает сказываться явление магнитного насыщения стали. В соответствии с этим начинает уменьшаться магнитная проницаемость μ стали генератора, а магнитное сопротивление ее увеличиваться. Следовательно, ампер-витки обмотки возбуждения теперь уже значительно больше расходуются в стали, чем до момента магнитного насыщения (примерно 40% общего числа ампер-витков). В силу этого зависимость между магнитным потоком Φ и, следовательно, между электродвижущей силой E генератора и током возбуждения i_b уже становится нелинейной (криволинейный участок bc характеристики).

При дальнейшем увеличении тока возбуждения i_b в стали генератора возникает сильное магнитное насыщение. В этом случае магнитная проницаемость стали μ становится небольшой, а магнитное сопротивление стали, наоборот, возрастает. Теперь уже требуется много ампер-витков, чтобы поддержать необходимый магнитный поток Φ и, следовательно, значительно увеличить ток возбуждения i_b генератора. В этом случае магнитный поток и соответственно электродвижущая сила генератора изменяются в зависимости от тока возбуждения вновь по линейному закону (прямолинейный участок cd). Однако быстрота роста электродвижущей силы E теперь заметно меньше и соответственно прямолинейный участок cd характеристики холостого хода получается более пологим, чем ее прямолинейный участок ab .

Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением имеет важное значение при изучении режима работы генератора. Например, зная характеристику холостого хода, можно выяснить магнитное состояние стали генератора и, сообразуясь с этим, выбрать для него наиболее оптимальный режим работы. По крутизне подъема характеристики холостого хода при малых значениях тока возбуждения можно судить о том, как распределяются ампер-витки обмотки возбуждения между сталью и воздушными зазорами. Чем меньше крутизна подъема характеристики холостого хода, тем, следовательно, относительно больше ампер-витков расходуется в воздушных зазорах генератора.

Внешняя характеристика генератора. Когда генератор нормально возбужден, т. е. при нормальном числе оборотов якоря в минуту имеет номинальную электродвижущую силу, его можно нагрузить током, подключив к нему потребители электрической энергии.

Нагруженный генератор создает в цепи ток

$$I = \frac{E}{r_a + R},$$

где I — нагрузка генератора в амперах;
 E — электродвижущая сила генератора в вольтах;
 r_a — сопротивление якорной обмотки в омах;
 R — эквивалентное сопротивление внешнего участка цепи (потребителей).

Рассмотрим внешнюю характеристику генератора.

Как известно, внешней характеристикой генератора называется зависимость напряжения U на его зажимах от его нагрузки I при $n = \text{const}$ и $r_b = \text{const}$.

Напряжение на зажимах генератора

$$U = E - Ir_a, \quad (569)$$

т. е. оно равно электродвижущей силе E генератора без падения напряжения Ir_a в якорной обмотке генератора.

Из формулы (569) следует, что величина напряжения U на зажимах генератора находится в сложной зависимости от нагрузки I , так как сама электродвижущая E зависит от величины нагрузки.

При токе $I = 0$ (режим холостого хода) напряжение на зажимах генератора равно его электродвижущей силе:

$$U = U_{x. x} = E.$$

С ростом нагрузки I генератора напряжение на его зажимах начинает уменьшаться. Это объясняется тем, что с ростом тока I увеличивается падение напряжения Ir_a в якорной обмотке генератора и одновременно с этим уменьшается электродвижущая сила генератора из-за влияния реакции якоря, снижающей магнитный поток генератора.

На рис. 464 приведена внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением.

Так как сопротивление r_a якорной обмотки генератора относительно мало (десятые или сотые доли ома), а влияние реакции якоря обычно слабо благодаря применению дополнительных магнитных полюсов, то напряжение U на зажимах генератора в режиме от холостого хода до номинальной нагрузки изменяется в пределах 5—10% номинальной величины.

Внешняя характеристика генератора весьма важна в том отношении, что она дает представление о том, насколько устойчиво напряжение на зажимах генератора при изменении его нагрузки и при $n = \text{const}$ и $r_b = \text{const}$.

Для поддержания постоянства напряжения U на зажимах генератора при изменении нагрузки I пользуются реостатом возбуждения. Увеличивая или уменьшая ток возбуждения i_b генератора путем изменения сопротивления r_b реостата возбуждения, соответственно увеличивают или уменьшают электродвижущую силу генератора и, следовательно, напряжение на его зажимах.

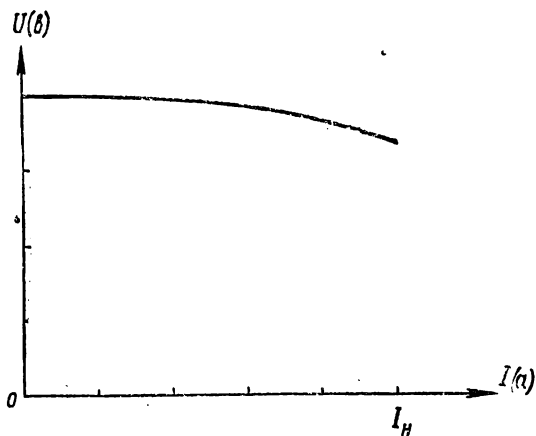


Рис. 464. Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением

Регулировочная характеристика. Для поддержания постоянства напряжения U на зажимах генератора при изменении нагрузки I необходимо изменять ток возбуждения i_b генератора.

Зависимость тока возбуждения i_b генератора от нагрузки I при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$ называется регулировочной характеристикой генератора.

На рис. 465 приведена регулировочная характеристика генератора постоянного тока с независимым возбуждением. При холостом ходе ($I = 0$) генератор имеет минимальный ток возбуждения i_{b0} . Затем по мере роста нагрузки I генератора ток возбуждения i_b также растет. Это понятно, так как для поддержания постоянства напряжения U на зажимах генератора необходимо увеличивать электродвижущую силу E его, что и достигается увеличением тока возбуждения i_b .

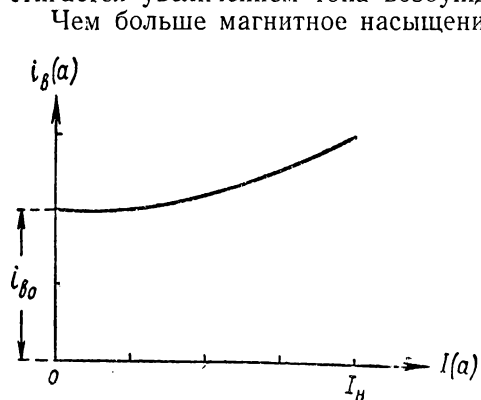


Рис. 465. Регулировочная характеристика генератора с независимым возбуждением

Чем больше магнитное насыщение стали генератора, тем при прочих одинаковых условиях круче поднимается график регулировочной характеристики генератора. Это объясняется тем, что в данном случае с ростом тока в якорной обмотке усиливается размагничивающее действие реакции якоря и для компенсации его необходимо затратить большее число ампер-витков обмотки возбуждения.

Достоинство генераторов постоянного тока с не-

зависимым возбуждением заключается в их хорошей внешней характеристике, так как ток возбуждения i_v генератора независим от напряжения на зажимах генератора. Недостаток таких генераторов — необходимость иметь посторонний источник электрической энергии, питающий постоянным током обмотку возбуждения генератора.

Генераторы постоянного тока с независимым возбуждением применяются главным образом в мощных сильноточных установках. Для питания обмоток возбуждения этих генераторов обычно применяются отдельные генераторы постоянного тока низкого напряжения.

§ 213. ГЕНЕРАТОР С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

В отличие от генератора с независимым возбуждением генератор с параллельным возбуждением относится к электрическим машинам с самовозбуждением. Это значит, что генератор данного типа сам питает ток свою обмотку возбуждения и не нуждается в постороннем источнике электрической энергии.

На рис. 466 показана схема генератора постоянного тока с параллельным возбуждением. Обмотка возбуждения генератора подключена параллельно к якорной обмотке генератора.

Для регулировки напряжения на зажимах генератора применяются реостаты возбуждения (шунтовые реостаты), включенные последовательно с обмотками возбуждения. Эти реостаты, как правило, снабжаются холостыми контактами, при помощи которых можно осуществить короткое замыкание обмотки возбуждения на себя. Последнее необходимо при выключении обмотки возбуждения. Если выключить обмотку возбуждения путем разрыва ее цепи, то исчезающее магнитное поле электромагнита создаст в обмотке очень большую электродвижущую силу самоиндукции, которая сможет пробить витки обмотки и вывести генератор из строя. Если же при выключении обмотки возбуждения замкнуть ее на себя через холостой контакт, то энергия исчезающего магнитного поля без вреда для генератора будет израсходована в его обмотке возбуждения на тепло. В этом случае электродвижущая сила самоиндукции в обмотке возбуждения не превысит номинального напряжения на зажимах генератора.

Самовозбуждение генератора. Процесс самовозбуждения генератора с параллельным возбуждением происходит следующим образом.

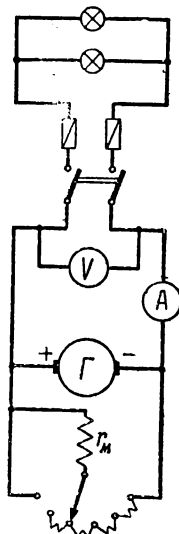


Рис. 466. Схема генератора с параллельным возбуждением

Сердечники электромагнитов генератора изготовлены из литой стали, а поэтому в них всякий раз после прекращения работы генератора сохраняется некоторый остаточный магнетизм. Поэтому при вращении якоря генератора в магнитном поле остаточного магнетизма индуцируется небольшая электродвижущая сила, составляющая 2—5% номинальной электродвижущей силы генератора.

Так как обмотка возбуждения генератора подключена к его зажимам, то в ней под влиянием индуцированной электродвижущей силы возникает небольшой ток возбуждения, который создает дополнительный магнитный поток в генераторе. Если обмотка подключена правильно к зажимам генератора, то этот

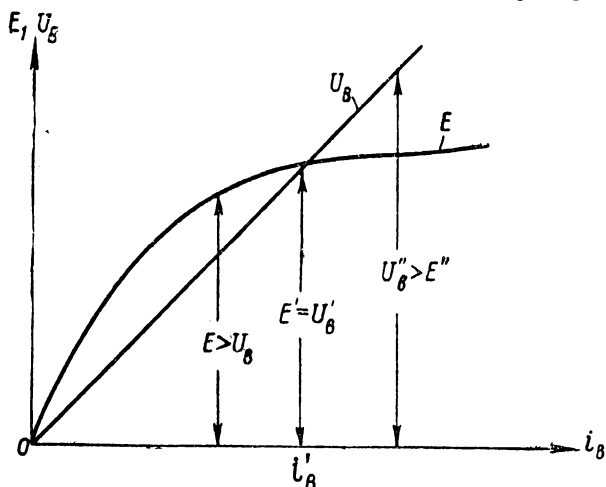


Рис. 467. Характеристика холостого хода генератора с параллельным возбуждением

поток направлен попутно с магнитным потоком остаточного магнетизма. В результате этого индуцированная электродвижущая сила генератора увеличивается, а с ней вместе возрастает ток возбуждения, способствующий дальнейшему увеличению электродвижущей силы, и т. д.

Казалось бы, процесс нарастания электродвижущей силы E генератора (процесс самовозбуждения генератора) должен непрерывно прогрессировать, т. е. электродвижущая сила генератора должна неограниченно возрастать. Однако этого не наблюдается, всякий раз рост индуцированной электродвижущей силы генератора при его самовозбуждении ограничен тем или иным пределом. Чтобы уяснить это, необходимо рассмотреть характеристику холостого хода генератора.

Характеристика холостого хода. На рис. 467 приведена характеристика холостого хода генератора с параллельным возбу-

ждением, т. е. кривая зависимости напряжения U на зажимах от тока возбуждения i_b генератора при $n = \text{const}$ и $r_b = \text{const}$.

Одновременно с этим на рис. 467 показан график зависимости падения напряжения U_b в цепи возбуждения генератора от тока возбуждения i_b . Эта зависимость линейна, так как

$$U_b = i_b (r_m + r_b),$$

где $r_m + r_b$ — сопротивление цепи возбуждения ($r_m + r_b = \text{const}$).

Из рис. 467 видно, что при малых величинах тока возбуждения i_b электродвижущая сила E больше падения напряжения U_b в обмотке возбуждения:

$$E > U_b.$$

Значит, в этом случае генератор питает током свою обмотку возбуждения. В соответствии с этим в генераторе происходит нормальный процесс самовозбуждения, т. е. с ростом тока возбуждения i_b растут электродвижущая сила E и напряжение U_b на обмотке возбуждения, что в свою очередь влечет за собой увеличение тока возбуждения i_b и т. д. Однако быстрота роста электродвижущей силы E и напряжения U_b , как это видно из рис. 467, различна. По мере увеличения тока возбуждения скорость роста электродвижущей силы E спадает, а скорость роста напряжения U_b сохраняется неизменной. При некоторой величине тока возбуждения i'_b напряжение U'_b становится равным электродвижущей силе E' :

$$U'_b = E'.$$

При токе возбуждения, равном i'_b , графики электродвижущей силы E и напряжения U_b пересекаются, а при дальнейшем росте тока возбуждения они расходятся. В последнем случае электродвижущая сила E становится меньше напряжения U_b . Однако практически этого не бывает, так как напряжение U_b , как часть электродвижущей силы E , не может быть больше нее.

Следовательно, значение тока возбуждения i'_b — это предельная величина его при заданном числе оборотов якоря генератора $n = \text{const}$ и постоянстве сопротивления цепи возбуждения $r_m = \text{const}$.

Угол наклона прямой, выражающей зависимость напряжения U_b на зажимах генератора от тока возбуждения i_b (рис. 467), зависит от сопротивления цепи возбуждения и, следовательно, от сопротивления r_b шунтового реостата, имеющегося в цепи возбуждения. Чем больше это сопротивление, тем круче поднимается прямая зависимости U_b от i_b и тем при меньшем токе возбуждения произойдет пересечение графиков зависимости U_b и E от тока возбуждения i_b .

Процесс самовозбуждения генератора с параллельным возбу-

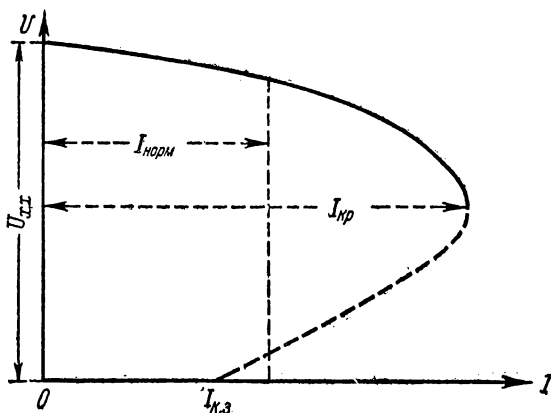


Рис. 468. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением

ждением длится до тех пор, пока ток возбуждения i_v не достигает некоторой предельной величины при заданных нормальных оборотах якоря генератора и электродвижущая сила E не становится равной номинальному своему значению. Обычно процесс самовозбуждения генератора длится доли минуты.

Если обмотка возбуждения генератора подключена неправильно к якорной обмотке, то генератор не возбуждается, так как ток возбуждения создает магнитный поток, направленный навстречу остаточному магнитному потоку, и машина размагнитится.

Внешняя характеристика генератора. На рис. 468 показана внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением, т. е. зависимость напряжения U на его зажимах от нагрузки I при постоянстве числа оборотов n якоря генератора и постоянном сопротивлении его цепи возбуждения. При холостом ходе генератора напряжение на его зажимах максимально ($U_{x. x}$). Затем с ростом нагрузки I генератора напряжение U на его зажимах начинает падать, и несколько быстрее, чем у генератора с независимым возбуждением. Это объясняется тем, что в данном случае напряжение U уменьшается не только в результате возрастающего влияния реакции якоря и падения напряжения в якорной обмотке, но и за счет того, что с уменьшением напряжения на зажимах генератора уменьшается его ток возбуждения i_v и в соответствии с этим снижается величина самой электродвижущей силы E .

При непрерывном уменьшении сопротивления потребителя и, следовательно, увеличении нагрузки I напряжение U на зажимах генератора непрерывно возрастает.

Однако вскоре наступает режим, при котором дальнейшее уменьшение сопротивления потребителя приводит не к увеличению нагрузки I генератора, а, наоборот, к уменьшению ее,

Предельное значение тока генератора при непрерывном уменьшении сопротивления потребителя называется критическим током генератора (рис. 468). Величина его примерно 2—2,5 раза больше номинального значения тока генератора.

В пределе, при коротком замыкании генератора, т. е. когда внешнее сопротивление станет равным нулю, напряжение на зажимах генератора также станет равным нулю, а ток генератора станет равным току короткого замыкания генератора. Однако он большой опасности для генератора не представляет, так как его величина не превышает номинального тока генератора. Это объясняется тем, что он существует за счет небольшой электродвижущей силы генератора, индуктированной под действием остаточного магнитного поля.

Переход генератора через режим критического тока сопровождается сильным искрением под щетками коллектора из-за чрезмерной перегрузки генератора и поэтому нежелателен.

У генераторов с параллельным возбуждением, не имеющих добавочных полюсов, изменение напряжения U в режиме от холостого хода до нормальной нагрузки составляет 12—20%, а у генераторов с добавочными полюсами — 8—15% номинального напряжения.

Регулировочная характеристика. На рис. 469 изображена регулировочная характеристика генератора с параллельным возбуждением, т. е. график зависимости тока возбуждения i_b от нагрузки I генератора при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

Эта характеристика практически мало отличается от аналогичной характеристики генератора с независимым возбуждением. При одинаковой их нагрузке ток в якорной обмотке генератора с параллельным возбуждением больше, чем ток в якорной обмотке генератора с независимым возбуждением, на величину тока возбуждения первого из них. Поэтому в генераторе с параллельным возбуждением при всех прочих одинаковых условиях падение напряжения в якорной обмотке генератора и реакция якоря больше, что требует большего тока возбуждения. Следовательно, регулировочная характеристика должна подниматься круче, чем у генератора с независимым возбуждением.

Одно из существенных достоинств генераторов постоянного тока с параллельным возбуждением — то, что

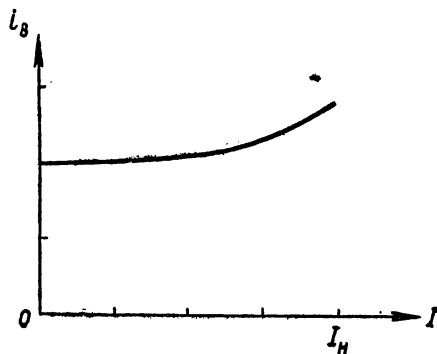


Рис. 469. Регулировочная характеристика генератора с параллельным возбуждением

машины во внешней цепи ток в якорной обмотке генератора резко возрастает. В результате резко увеличивается падение напряжения в якорной обмотке, что в свою очередь сильно снижает напряжение на зажимах генератора, ток возбуждения, электродвижущую силу генератора и ток в якорной обмотке. Все эти процессы совершаются настолько быстро, что весьма кратковременный критический ток не успевает перегреть провода якорной обмотки.

Другое важное преимущество генератора с параллельным возбуждением перед генератором с независимым возбуждением — отсутствие необходимости в первом из них иметь отдельный источник постоянного тока, питающий обмотку возбуждения генератора.

Генераторы постоянного тока с параллельным возбуждением получили широкое применение на практике, и в частности в технике связи для зарядных агрегатов, для питания радиостановок и т. д.

§ 214. ГЕНЕРАТОР С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Генератор с последовательным возбуждением имеет обмотку возбуждения, включенную последовательно с якорной обмоткой (рис. 470).

Ток в обмотке возбуждения i_v равен току (нагрузке) I генератора:

$$i_v = I.$$

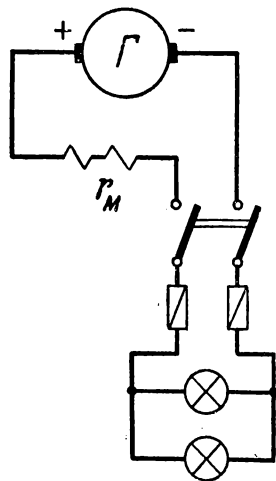


Рис. 470. Схема генератора с последовательным возбуждением

Так как нагрузка I генератора с последовательным возбуждением при холостом ходе его равна нулю, то и ток возбуждения i_v его равен нулю. Следовательно, снять характеристику холостого хода генератора, т. е. зависимость напряжения U на зажимах генератора от тока возбуждения i_v при $n = \text{const}$, в данном генераторе невозможно.

Напряжение на зажимах генератора с последовательным возбуждением при холостом ходе составляет несколько процентов номинального напряжения генератора, так как оно обусловлено действием магнитного поля остаточного магнетизма стали генератора.

Следовательно, чтобы возбудить генератор, необходимо присоединить к нему внешнюю цепь (потребители), этим самым создав условие для возникновения тока в обмотке возбуждения.

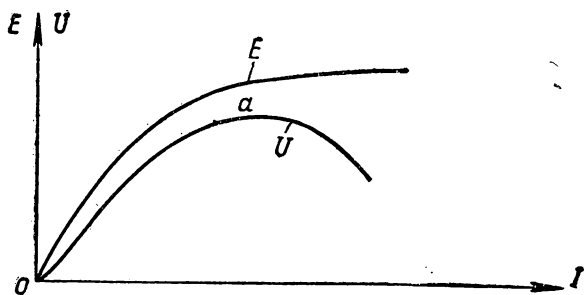


Рис. 471. Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением

Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением приведена на рис. 471. Напряжение U на зажимах генератора вначале растет вместе с нагрузкой I генератора (участок кривой oa), а затем начинает уменьшаться. Это объясняется следующим. Вначале с ростом нагрузки I растет и ток возбуждения i_b , так как $i_b = I$, а следовательно, растут электродвижущая сила E и напряжение U на зажимах генератора. Однако затем по мере увеличения нагрузки I генератора напряжение U на его зажимах начинает спадать, потому что падение напряжения $I r_a$ внутри якорной обмотки становится все более ощутимым. Кроме того, электродвижущая сила E генератора по мере магнитного насыщения стали генератора увеличивается очень мало, а поэтому, невзирая на ее некоторый рост, напряжение на зажимах генератора после некоторой предельной нагрузки I начинает уменьшаться.

Регулировочную характеристику генератора с последовательным возбуждением снять нельзя, потому что при изменении нагрузки генератора невозможно подобрать ток его возбуждения так, чтобы сохранить напряжение на зажимах генератора постоянным по своей величине.

Основной недостаток генератора с последовательным возбуждением — резко выраженная зависимость напряжения U на его зажимах от нагрузки I . Из-за этого генераторы с последовательным возбуждением очень редко применяются на практике, так как громаднейшее большинство потребителей электрической энергии требует для своей нормальной работы строго определенного номинального напряжения. Генераторы с последовательным возбуждением могут применяться только в условиях строгого постоянства нагрузки.

§ 215. ГЕНЕРАТОР СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

На рис. 472 приведена схема цепи, состоящей из генератора со смешанным возбуждением и подключенных к нему потребителей. Генератор имеет две обмотки возбуждения, из которых

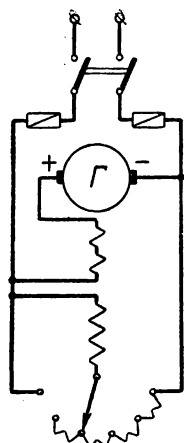


Рис. 472. Схема генератора со смешанным возбуждением

одна, состоящая из большого числа витков тонкой проволоки, подключена параллельно к якорной обмотке генератора, а другая, состоящая из небольшого числа витков относительно толстой проволоки,— последовательно. В цепь обмотки параллельного возбуждения включен реостат возбуждения, с помощью которого регулируется ток возбуждения в этой обмотке.

Наличие параллельной и последовательной обмоток возбуждения в генераторе дает возможность сочетать в нем в необходимой мере характеристики генераторов с параллельным и последовательным возбуждением.

Характеристика холостого хода. Так как генератор при холостом ходе отключен от внешней цепи (от потребителей), то нагрузка его равна нулю ($I = 0$) и в соответствии с этим ток возбуждения в последовательной обмотке возбуждения также равен нулю. Следовательно, характеристика совершенно аналогична характеристике холостого хода генератора с параллельным возбуждением (рис. 473).

Процесс самовозбуждения генератора со смешанным возбуждением такой же, как и в генераторе с параллельным возбуждением, так как последовательная обмотка возбуждения не принимает участия в самовозбуждении генератора из-за отсутствия в ней в это время тока возбуждения.

Внешняя характеристика. Вид внешней характеристики генератора со смешанным возбуждением зависит от соотношения ампер-витков обмоток параллельного и последовательного воз-

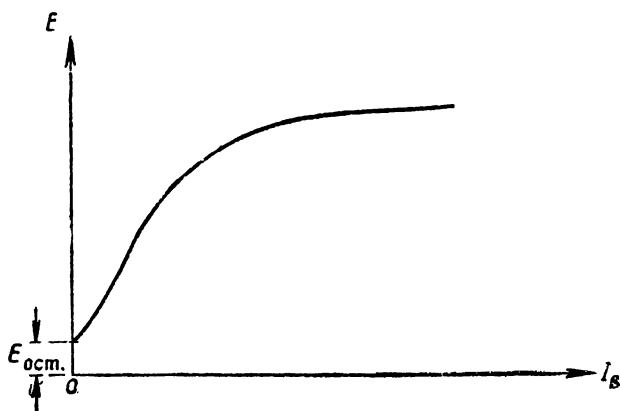


Рис. 473. Характеристика холостого хода генератора со смешанным возбуждением

буждения и от направления магнитных потоков, создаваемых этими ампер-витками.

На рис. 474 приведено несколько типичных внешних характеристик генератора со смешанным возбуждением. При холостом ходе генератора, т. е. при $I = 0$, напряжение на его зажимах равно номинальной величине U_n . Оно получено в результате действия ампер-витков параллельной обмотки возбуждения в процессе самовозбуждения генератора. Затем, начиная с момента включения нагрузки и последующего роста ее, напряжение на зажимах генератора начинает изменяться. Это изменение напряжения U в зависимости от нагрузки I происходит для различных генераторов по-разному, так как оно зависит от соотношения ампер-витков последовательной и параллельной обмоток генератора. Например, внешняя характеристика 1 относится к такому

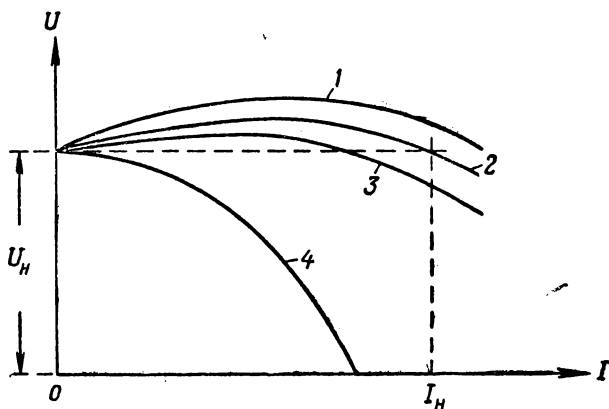


Рис. 474. Внешние характеристики генератора со смешанным возбуждением

генератору со смешанным возбуждением, у которого решающее влияние на внешнюю характеристику имеют ампер-витки последовательной обмотки возбуждения. Здесь при холостом ходе генератора ($I = 0$) напряжение на его зажимах имеет некоторое номинальное значение U_n , а затем с ростом нагрузки I оно начинает несколько увеличиваться за счет преобладающего действия последовательной обмотки возбуждения и достигает максимума при нагрузке меньше номинальной. По мере приближения нагрузки к номинальной I_n напряжение U начинает спадать. И когда ток I достигает номинального значения, напряжение U все же несколько выше номинального. Генераторы с подобного рода внешними характеристиками обычно применяются при передаче электрической энергии по длинным линиям. Прирост напряжения на зажимах генератора при номинальной его нагрузке в этом случае предусмотрен таким, чтобы скомпенсиро-

вать возросшее падение напряжения в проводах и этим сохранить постоянство напряжения у потребителей, включенных в конце длинной линии.

Внешняя характеристика 2 относится к такому генератору, у которого напряжение на зажимах при номинальной нагрузке такое же по величине, как и при холостом ходе. У генератора подобного рода ампер-витки последовательной обмотки возбуждения подобраны таким образом, что напряжение на зажимах генератора вначале несколько растет, а затем, достигнув максимума, спадает и при номинальной нагрузке становится равным номинальному напряжению.

Чем меньше влияние ампер-витков последовательной обмотки возбуждения по сравнению с влиянием ампер-витков параллельного возбуждения, тем больше внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением приближается к аналогичной характеристике генератора с параллельным возбуждением. Внешняя характеристика 3 относится как раз к такому генератору со смешанным возбуждением, у которого решающее влияние на характер внешней характеристики оказывает параллельная обмотка возбуждения.

Если последовательная обмотка возбуждения генератора со смешанным возбуждением включена таким образом, что она создает магнитное поле, направленное навстречу магнитному полю, создаваемому параллельной обмоткой возбуждения, то внешняя характеристика генератора принимает вид графика 4. Здесь мы видим, что при холостом ходе генератора напряжение на его зажимах равно номинальному напряжению U_n , полученному в результате действия ампер-витков параллельной обмотки возбуждения. Если генератор постепенно нагружается, то вступают в действие ампер-витки последовательной обмотки возбуждения, в результате чего напряжение на зажимах генератора начинает падать. Это объясняется тем, что магнитный поток, создаваемый ампер-витками последовательной обмотки возбуждения, направлен навстречу магнитному потоку, создаваемому параллельной обмоткой. По мере увеличения нагрузки генератора и соответственно тока возбуждения последовательной обмотки быстрота убывания напряжения на зажимах генератора все более и более возрастает. Это в конце концов приводит к тому, что нагрузка генератора еще не успевает достигнуть номинальной величины, как напряжение на зажимах генератора уже становится равным нулю.

Генераторы с встречным включением последовательной и параллельной обмоток возбуждения применяются в том случае, когда от генератора желают получить постоянный по величине ток при изменении сопротивления внешней цепи от некоторого конечного значения до нуля (до короткого замыкания). Примером подобного рода потребителя может служить электросварочный аппарат, в котором сопротивление при работе может

изменяться от некоторого конечного значения практически до нуля.

Регулировочная характеристика. На рис. 475 представлена регулировочная характеристика генератора со смешанным возбуждением.

При холостом ходе генератора ток возбуждения равен некоторой величине $i_{в0}$, а затем с ростом нагрузки I генератора он начинает падать. Это понятно, так как с появлением нагрузки I генератора вступает в действие последовательная обмотка возбуждения, магнитное поле которой действует согласнo с магнитным полем параллельной обмотки возбуждения. Следовательно, для поддержания постоянства результирующего магнитного потока, а значит, и постоянства напряжения на зажимах генератора необходимо вначале несколько снизить ток возбуждения $i_{в}$ в параллельной обмотке возбуждения.

Однако по мере роста нагрузки генератора и приближения ее к номинальной ток возбуждения генератора начинает расти. Это объясняется тем, что с ростом нагрузки генератора усиливается влияние реакции якоря, увеличивается падение напряжения в якорной обмотке и возникает магнитное насыщение в стали генератора. А все это, как известно, снижает напряжение на зажимах генератора. Следовательно, в данном случае для поддержания постоянства напряжения на зажимах генератора необходимо увеличивать ток в параллельной обмотке возбуждения. В результате этого ток возбуждения $i_{в}$ параллельной обмотки возбуждения достигает при номинальной нагрузке $I_{н}$ генератора величины, примерно равной току возбуждения при холостом ходе генератора.

Основное преимущество генераторов со смешанным возбуждением перед прочими типами генераторов постоянного тока — их способность поддерживать практически постоянным напряжение на своих зажимах при изменении нагрузки в широких пределах.

К недостаткам генераторов со смешанным возбуждением следует отнести их боязнь коротких замыканий и сложность конструкций из-за наличия в них последовательной и параллельной обмоток возбуждения.

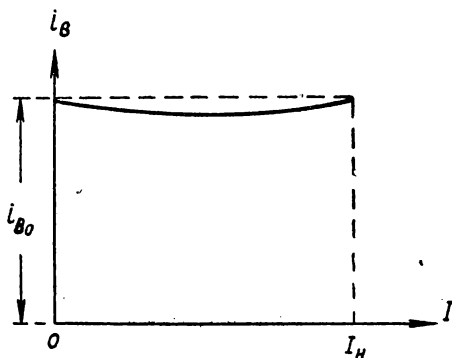


Рис. 475. Регулировочная характеристика генератора со смешанным возбуждением

Благодаря своей хорошей внешней характеристике генераторы со смешанным возбуждением получили достаточно широкое применение на практике.

§ 216. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Как известно, каждый генератор электрической энергии работает с наибольшим коэффициентом полезного действия при полной своей нагрузке. Следовательно, если генератор нагружен слабо, то режим работы его мало экономичен. Для экономичной работы генераторов в сети с сильно изменяющейся нагрузкой ее обычно питают от нескольких генераторов, соединенных

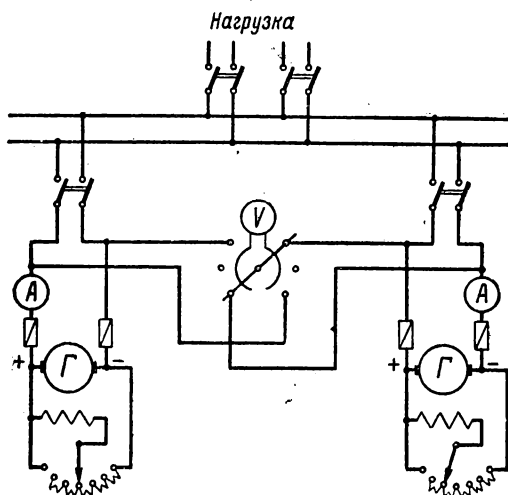


Рис. 476. Схема включения на параллельную работу двух генераторов с параллельным возбуждением

параллельно друг с другом. В те часы суток, когда нагрузка велика, например нагрузка осветительной сети в вечернее время, одновременно работает несколько генераторов с полной нагрузкой, а в те часы, когда нагрузка резко снижается, например в дневное время, работает только какой-либо один из генераторов на полную нагрузку. Одна из основных задач электрической станции состоит в правильной регулировке работы генераторов в соответствии с потребностями приемников электрической энергии.

На рис. 476 приведена схема параллельного соединения двух шунтовых генераторов, питающих сеть. В схеме генераторов есть амперметры, измеряющие нагрузку генераторов. При помощи кабеля генераторы через предохранители и рубильники присоединены к распределительным шинам параллельно, т. е. их по-

ложительные зажимы присоединены к одной шине, положительной (+), а отрицательные — к другой, отрицательной (—). Чтобы можно было быстро отличить положительную шину от отрицательной, их обычно окрашивают в разные цвета, например положительную в синий, а отрицательную в красный. Шины изготавливаются из медных полос прямоугольного сечения, размеры которого зависят от мощности всей установки.

Непосредственно к шинам через рубильник и предохранители при помощи кабеля подключается внешняя цепь. Вольтметр магнитоэлектрической системы и специальный переключатель дают возможность измерять напряжение на зажимах каждого из генераторов и полярность каждого генератора.

На параллельную работу генераторы включают следующим образом.

Допустим, что один из генераторов, который назовем первым, работает на сеть. В результате возросшей нагрузки он оказался перегруженным и возникла необходимость включить второй генератор. Для этого после предварительного внешнего осмотра генератора его запускают в ход, добываясь нормального числа оборотов и нормального напряжения на зажимах. Когда при помощи магнитоэлектрического вольтметра убедятся в том, что напряжение на зажимах второго генератора равно напряжению на зажимах первого генератора и что полярность его соблюдена, замыкают рубильник второго генератора, подключая его к распределительным шинам.

Так как электродвижущая сила второго генератора точно равна напряжению на распределительных шинах, то он не посылает ток в сеть и не потребляет его из сети. Если бы электродвижущая сила второго генератора была меньше напряжения на распределительных шинах, то первый генератор послал бы ток во второй и тот начал бы работать электродвигателем.

Чтобы загрузить второй генератор, т. е. перевести на него часть нагрузки с первого генератора, необходимо несколько увеличить электродвижущую силу второго генератора, изменив ток в его обмотке возбуждения при помощи шунтового реостата. Тогда второй генератор пошлет некоторый ток во внешнюю цепь, и чем больше будет его электродвижущая сила по сравнению с напряжением на распределительных шинах, тем больше будет величина этого тока. Одновременно с этим, уменьшая ток возбуждения первого генератора, уменьшают его электродвижущую силу, а в соответствии с этим и его нагрузку. Таким образом, изменяя токи возбуждения в генераторах, можно перераспределить между ними общую нагрузку сети как угодно. При этом обращают внимание на то, чтобы при переводе нагрузки с одного генератора на другой напряжение на распределительных шинах оставалось неизменным. Это достигается одновременным регулированием токов возбуждения обоих генераторов.

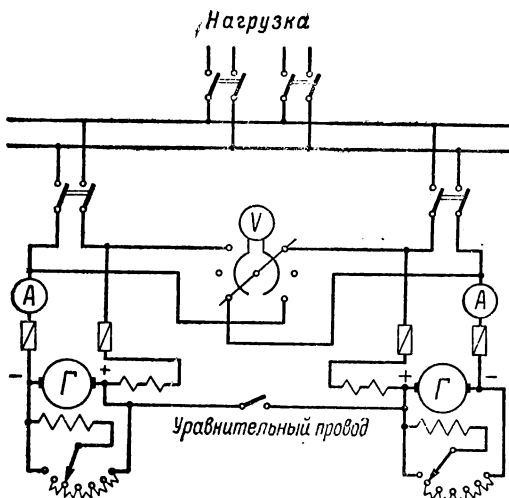


Рис. 477. Схема включения на параллельную работу двух генераторов со смешанным возбуждением

Порядок подключения на параллельную работу генераторов со смешанным возбуждением, отключения их и переключения нагрузки с одного генератора на другой такой же, как и при подключении и выключении шунтовых генераторов. Следует только отметить, что в схеме параллельно соединенных генераторов со смешанным возбуждением (рис. 477) есть у рав н и т е л ь н а я ш и н а (провод) между теми одноименными щетками генераторов, к которым подсоединен один из концов последовательной обмотки возбуждения генератора. Эта уравнильная шина (провод) необходима для устойчивой параллельной работы генераторов. Если у одного из генераторов, например второго, почему-нибудь уменьшится электродвижущая сила, то первый генератор пошлет ток во второй, и тот начнет работать в режиме электродвигателя, что неизбежно приведет к аварии. При наличии же уравнильной шины первый генератор пошлет по ней ток в последовательную обмотку второго генератора, усилит ее магнитное поле и этим увеличит электродвижущую силу второго генератора до необходимой величины. Следовательно, при помощи уравнильной шины достигается автоматическая регулировка электродвижущих сил параллельно работающих генераторов со смешанным возбуждением, что приводит к стабильности их работы.

§ 217. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА С АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕЕЙ

Одна из наиболее распространенных схем параллельной работы генератора постоянного тока с аккумуляторной батареей — схема с буферной батареей.

Если возникает необходимость отключить генератор, например первый, от сети, то его ток возбуждения постепенно уменьшают и одновременно с этим увеличивают ток возбуждения второго генератора, переводя нагрузку первого на второй. Когда ток первого генератора достигнет нулевого значения, т. е. генератор разгрузится полностью, его отключают от распределительных шин, размыкая рубильник.

Если нагрузка в сети мала, то генератор обслуживает сеть и в то же время заряжает аккумуляторную батарею. Если же нагрузка в сети большая и генератор перегружен, то параллельно с ним начинает работать на сеть аккумуляторная батарея.

Таким образом, аккумуляторная батарея, помогая генератору, служит как бы буфером между ним и нагрузкой (отсюда название — буферная батарея): в соответствии с изменением нагрузки она или забирает от генератора излишек его энергии, давая ему возможность работать на полную нагрузку, с наиболее высоким к. п. д., или же разряжается на сеть и этим облегчает работу генератора в моменты образования пика нагрузки.

В схеме с буферной батареей важную роль играет двойной элементный коммутатор, позволяющий подбирать необходимое число аккумуляторных элементов на заряд или разряд батареи. На рис. 478 изображен внешний вид двойного элементного коммутатора, состоящего из двух рычагов, сидящих на общей оси вращения и изолированных друг от друга. Один из этих рычагов называется зарядным, а другой разрядным, так как через первый из них осуществляется включение аккумуляторных элементов на заряд, а через второй — на разряд. При повороте вокруг оси рычаги скользят своими концами по одним и тем же контактным пластинам, изолированным друг от друга. Каждая из этих пластин соединена проводом с соответствующим аккумуляторным элементом. Следовательно, устанавливая зарядный или разрядный рычаг на ту или иную контактную пластину, мы подключаем через двойной элементный коммутатор соответствующее количество аккумуляторных элементов на заряд или разряд.

В схеме, изображенной на рис. 479, разрядный и зарядный рычаги двойного элементного коммутатора обозначены соответственно через P_1 и P_2 . На схеме для большей наглядности показано, что рычаги P_1 и P_2 могут скользить только по своим контактам. Фактически же оба рычага скользят по одним и тем же контактам и в строго определенной последовательности один за другим: зарядный рычаг P_2 должен быть всегда правее разрядного рычага P_1 , иначе вместо заряда аккумуляторных элементов может происходить их разряд.

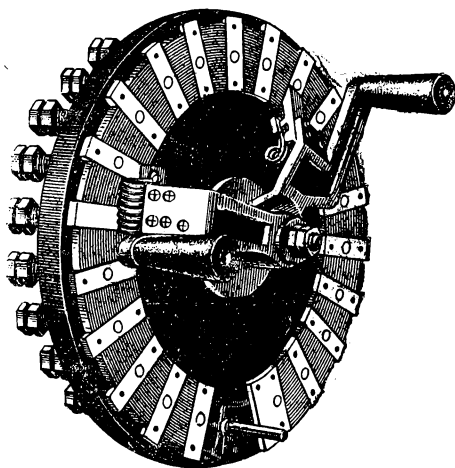


Рис. 478. Двойной элементный коммутатор

Ознакомившись в общих чертах с двойным элементным коммутатором, перейдем к рассмотрению основных режимов работы источников электрической энергии в схеме генератора с буферной батареей, снабженной двойным элементным коммутатором (рис. 479).

1. Работает генератор электрической энергии только на сеть.

Замыкают рубильники K_1 и K_2 . Рубильник K_3 остается разомкнутым, а переключатель P устанавливается в положение 2.

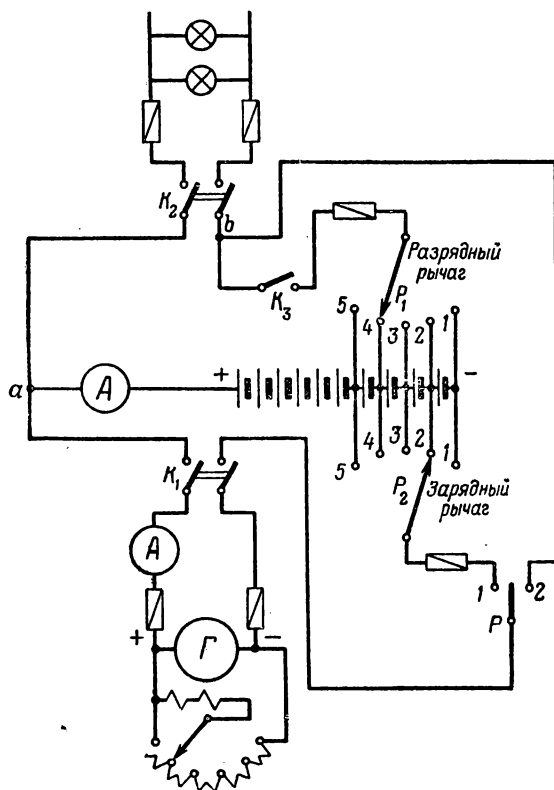


Рис. 479. Схема параллельной работы генератора с буферной батареей аккумуляторов

Тогда ток от плюс-зажима генератора идет через амперметр A к узловой точке a схемы и далее к потребителю, а затем через узловую точку b схемы и через переключатель P — к минус-зажиму генератора.

2. Работает батарея на сеть.

Замыкают рубильники K_2 и K_3 . Рубильник K_1 оставляют разомкнутым, а переключатель P устанавливают в среднее поло-

жение. Тогда ток от плюс-зажима батареи идет через амперметр A к узловой точке a схемы, а отсюда к потребителю и затем возвращается через узловую точку b схемы и разрядный рычаг P_1 к минус-зажиму батареи. Нетрудно видеть, что все аккумуляторные элементы, находящиеся правее разрядного рычага P_1 (1, 2, 3), не принимают участия в разряде батареи. Чтобы ввести их в действие, необходимо рычаг P_1 перевести вправо. Таким образом, перемещая разрядный рычаг P_1 , можно регулировать напряжение, подаваемое батареей на потребитель.

3. Работают генератор и батарея совместно на сеть.

Замыкают рубильники K_1 , K_2 и K_3 , а переключатель P устанавливают в положение 2. Тогда к точке a схемы притекает как ток генератора, так и ток батареи, а отсюда суммарный ток идет к потребителю и затем возвращается к узловой точке b схемы, где он разветвляется. Одна часть его возвращается к минус-зажиму генератора через переключатель P , а другая часть — к минус-зажиму аккумуляторной батареи через разрядный рычаг P_1 .

4. Заряд батареи генератором.

Замыкают рубильник K_1 , а переключатель P ставят в положение 1. Рубильники K_2 и K_3 оставляют разомкнутыми. Тогда ток от плюс-зажима генератора идет к узловой точке a схемы, а отсюда через амперметр A к плюс-зажиму батареи и затем, пройдя батарею, возвращается через зарядный рычаг P_2 и переключатель P к минус-зажиму генератора. Поворачивая зарядный рычаг P_2 , можно изменять количество элементов, находящихся на заряде.

5. Одновременная работа генератора на сеть и на заряд батареи.

Замыкают рубильники K_1 , K_2 и K_3 , а переключатель P устанавливают в положение 1. Тогда ток генератора, дойдя до точки a схемы, разветвляется. Одна часть его идет через амперметр A и батарею, а другая, пройдя потребитель, узловую точку b схемы и разрядный рычаг P_1 , также поступает в батарею. Таким образом, в группе элементов, находящихся между рычагами P_1 и P_2 , протекает весь ток генератора, который, пройдя затем через зарядный рычаг P_2 и переключатель P , возвращается к минус-зажиму генератора. По мере того как заряжается батарея, т. е. напряжение ее растет, разрядный рычаг P_1 передвигается влево. Что же касается зарядного рычага P_2 , то он перемещается влево по мере того, как заканчивается заряд крайних элементов (№ 1, 2...).

Следует иметь в виду, что если напряжение на зажимах батареи превысит напряжение на зажимах генератора, то аккумулятор будет разряжаться через генератор и последний начнет работать в режиме электродвигателя, что приведет к аварии. Для предупреждения подобных

нежелательных случаев в схеме с буферной батареей служат приборы, которые или своевременно сигнализируют о возможном разряде батареи через генератор, или самостоятельно отключают генератор от сети. К последним типам приборов относятся минимальные автоматы, основанные на действии электромагнита. Если через обмотку электромагнита проходит ток не меньше установленного предела, то электромагнит притягивает якорь, служащий размыкателем цепи. Если ток в генераторе, а следовательно, и в обмотке электромагнита минимального автомата уменьшится ниже предела, то якорь электромагнита под влиянием силы тяжести отпадет от сердечника электромагнита и разомкнет цепь генератора.

ГЛАВА XXXVI

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 218. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электродвигателем называется электрическая машина, преобразующая электрическую энергию в механическую.

Работа электродвигателя основана на механическом взаимодействии проводников с током и внешнего магнитного поля.

Первый электродвигатель постоянного тока был изобретен русским ученым **Б. С. Якоби**. Этот электродвигатель был настолько совершенным, что оказалось возможным применить его на практике. В 1838 г. электродвигатель Якоби был применен для передвижения лодки, вмещавшей от 16 до 18 человек, причем лодка плыла по реке Неве при встречном течении и ветре. Это свидетельствовало о достаточно большой мощности электродвигателя. Но электродвигатель Якоби получал электрическую энергию от батареи гальванических элементов, так как в то время не было других, более мощных, источников электрической энергии. Поэтому использование электродвигателя Якоби для транспорта было менее выгодным, чем использование паровой машины. Замечательное изобретение **Б. С. Якоби** — электродвигатель постоянного тока — начало широко применяться после того, как появились генераторы электрической энергии, дающие в большом количестве дешевую электрическую энергию.

В настоящее время электродвигатели постоянного тока широко используются в электротехнике. Электрические железные дороги, трамвай, подъемные краны, лифты и ряд других установок обслуживаются электродвигателями постоянного тока.

Выдающийся русский ученый академик **Э. Х. Ленц** на основе открытого им закона электромагнитной индукции (правило Ленца) впервые установил принцип обратимости электрических машин.

Всякий генератор постоянного тока является обратимой машиной, т. е. если якорь и электромагниты генератора питать током от по-

стороннего источника электрической энергии, то он начнет работать электродвигателем, и, наоборот, если якорь электродвигателя вращать посторонним двигателем, то он будет работать в режиме генератора. На рис. 480 показана принципиальная схема электродвигателя постоянного тока. В проводниках, расположенных под северным полюсом, ток уходит от нас за плоскость чертежа, что и отмечено крестиками. В проводниках, расположенных под южным полюсом, ток течет из-за плоскости к нам, что показано точками. По правилу левой руки определим направление действия силы F на проводники якоря. На проводники, находящиеся под северным полюсом,

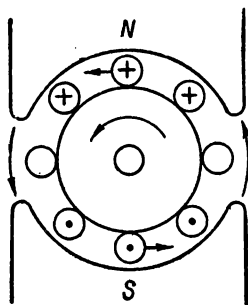


Рис. 480. Принципиальная схема электродвигателя постоянного тока

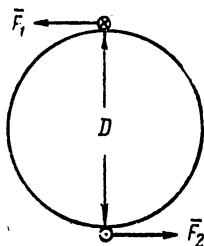


Рис. 481. Пара сил, действующая на якорь электродвигателя

силы действуют влево, а на проводники, находящиеся под южным полюсом,— вправо. Результирующие этих сил показаны на рис. 481 приложенными к двум диаметрально противоположным точкам якоря. Эта пара сил (F_1 и F_2) стремится вращать якорь электродвигателя против часовой стрелки.

Если в электродвигателе одновременно переменить ток в проводниках якоря и в электромагнитах, то направление вращения якоря электродвигателя не изменится.

Если же переменить направление тока только в проводниках якоря электродвигателя, оставив неизменной полярность электромагнитов, или, наоборот, переменить полярность электромагнитов, оставив направление тока в проводниках якоря неизменным, то направление вращения электродвигателя изменится на обратное.

Сила, действующая на каждый активный проводник якоря, определяется формулой

$$F = BIl, \quad (570)$$

где F — сила в ньютонах;

I — ток в амперах;

B — магнитная индукция в вольт-секундах на квадратный метр;

l — активная длина проводника в метрах.

Следовательно, чем сильнее внешнее магнитное поле, больше величина тока в проводниках якоря и больше активных проводников на якоре, тем больше тяговое усилие F , развиваемое на окружности якоря электродвигателя.

§ 219. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ, МОЩНОСТЬ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Суммируя силы, действующие на проводники якоря электродвигателя, получим пару равных сил $F_1 = F_2 = F$, приложенных к диаметрально противоположным точкам якоря. Плечо этой пары сил равно диаметру якоря D (см. рис. 481). Вращающий момент M пары сил относительно оси вращения равен произведению одной из сил этой пары на расстояние между направлениями действия этих сил, т. е.

$$M = FD, \quad (571)$$

где M — вращающий момент в ньютонметрах;

F — сила в ньютонах;

D — длина плеча пары сил в метрах.

Но результирующая сила F , как было указано ранее, складывается из совокупности сил, действующих на отдельные проводники, величины которых определяются по формуле

$$F_1 = BI_{\text{я}}l,$$

где F_1 — сила, действующая на отдельный проводник якоря, в ньютонах;

B — величина магнитной индукции в вольт-секундах на квадратный метр;

$I_{\text{я}}$ — ток в проводниках якорной обмотки в амперах;

l — активная длина каждого проводника якоря в метрах.

Следовательно, тяговое усилие электродвигателя равно

$$F = kF_1,$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивных особенностей электродвигателя.

Вращающий момент M электродвигателя равен

$$M = FD = kF_1D = kI_{\text{я}}BlD.$$

Но $ID = S$ — площадь просвета каждого отдельного контура якорной обмотки в квадратных метрах, а $BID = BS = \Phi$ — магнитный поток, пронизывающий площадь просвета каждого отдельного контура якорной обмотки в вольт-секундах.

В соответствии с этим величину вращающего момента электродвигателя можно выразить формулой

$$M = kI_{\text{я}}\Phi, \quad (572)$$

т. е. вращающий момент электродвигателя зависит от величины магнитного потока Φ , создаваемого электромагнитами электродвигателя, от величины тока в якорной обмотке и от конструктивных особенностей электродвигателя, учитываемых коэффициентом пропорциональности k .

Следовательно, чтобы увеличить вращающий момент M электродвигателя, необходимо увеличить ток $I_{\text{я}}$ в якоре электродвигателя и магнитный поток Φ , создаваемый его электромагнитами.

Мощность, поглощаемая электродвигателем из сети, больше, чем мощность, отдаваемая им на валу, так как часть энергии, поступающей в электродвигатель, теряется на тепловую энергию в обмотках электродвигателя, на вихревые токи, на перемагничивание, на трение в подшипниках и т. д.:

$$P_{\text{п}} = P + \sum P_{\text{к}},$$

где $P_{\text{п}}$ — мощность, поглощаемая электродвигателем из сети;
 P — полезная мощность, развиваемая электродвигателем;
 $\sum P_{\text{к}}$ — сумма мощностей потерь в электродвигателе.

Отношение полезной механической мощности, развиваемой электродвигателем на валу, к полной электрической мощности, потребляемой им из сети, называется коэффициентом полезного действия (к. п. д.) его:

$$\eta = \frac{P}{P_{\text{п}}},$$

где η — к. п. д. электродвигателя;
 P — полезная механическая мощность электродвигателя;
 $P_{\text{п}}$ — электрическая мощность, потребляемая электродвигателем из сети.

Коэффициент полезного действия электродвигателя зависит от степени его механической нагрузки. Обычно электродвигатели рассчитываются так, чтобы их максимальный к. п. д. приходился на нормальную нагрузку. Электродвигатели, обладающие большими мощностями, как правило, имеют большие к. п. д., чем электродвигатели малых мощностей. Среднее значение к. п. д. электродвигателей колеблется от 0,7 до 0,9.

Пример 218. Определить к. п. д. электродвигателя, развивающего на своем валу механическую мощность $P_1 = 5$ л. с., если при напряжении на зажимах электродвигателя $U = 125$ в он получает ток $I = 36,8$ а.

Решение. Полезная мощность

$$P_1 = 5 \cdot 736 = 3680 \text{ вт} = 3,68 \text{ квт.}$$

Потребляемая мощность

$$P = UI = 125 \cdot 36,8 = 4600 \text{ вт} = 4,6 \text{ квт.}$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_1}{P} = \frac{3,68}{4,6} = 0,8.$$

§ 220. ПРОТИВОЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

При работе электродвигателя его якорь вращается в магнитном поле с некоторой скоростью, зависящей от величины механической нагрузки электродвигателя.

Активные проводники якорной обмотки электродвигателя, перемещаясь вместе с якорем в магнитном поле, пересекают его магнитные линии, и в них индуцируется электродвижущая сила. Согласно правилу Ленца эта электродвижущая сила стремится противодействовать причине, вызвавшей ее, т. е. в данном случае она направлена навстречу току в проводниках якоря (см. рис. 480). Но если это так, то она направлена навстречу и напряжению U , приложенному к электродвигателю.

Электродвижущая сила, индуцированная в якорной обмотке электродвигателя, называется противоэлектродвижущей силой. Величина ее прямо пропорциональна скорости вращения якоря и величине магнитного потока электродвигателя:

$$E = cn\Phi, \quad (573)$$

где E — противоэлектродвижущая сила в вольтах;

n — число оборотов якоря электродвигателя в минуту;

Φ — магнитный поток в вольт-секундах;

c — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции электродвигателя.

Следовательно, величина тока в якорной обмотке электродвигателя зависит не только от величины приложенного к электродвигателю напряжения, но и от противоэлектродвижущей силы, индуцированной в этой обмотке:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{r_{\text{я}}}, \quad (574)$$

где $I_{\text{я}}$ — ток в якорной обмотке электродвигателя;

$r_{\text{я}}$ — сопротивление якорной обмотки.

Чем быстрее вращается якорь электродвигателя, тем больше противоэлектродвижущая сила в якорной обмотке и тем меньше ток $I_{я}$, протекающий по этой обмотке.

В пределе, когда число оборотов якоря электродвигателя в минуту равно нулю, ток в якорной обмотке при всех прочих равных условиях максимален, так как противоэлектродвижущая сила в якорной обмотке в этом случае равна нулю.

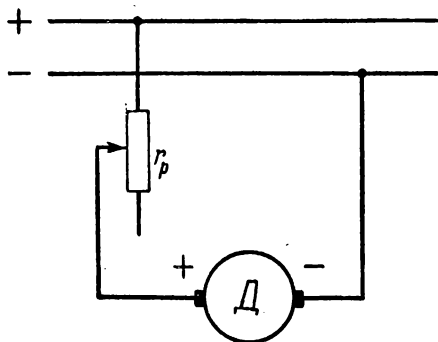


Рис. 482. Последовательно с электродвигателем включен пусковой реостат r_p

Так как сопротивление якорной обмотки электродвигателя обычно мало — порядка десятых или сотых долей ома, то при пуске электродвигателя в ход ток в якорной обмотке может оказаться чрезмерно большим и опасным для электродвигателя. Чтобы предотвратить возможность возникновения опасной величины пускового тока, на время пуска электродвигателя в ход подключают последовательно с якорной обмоткой пусковой реостат (рис. 482). Сопротивление его подбирается таким, чтобы начальный пусковой ток электродвигателя не превышал номинального его тока больше чем в полтора — два раза.

Величина пускового тока в начальный момент пуска электродвигателя в ход при включенном пусковом реостате будет равна

$$I_{нач} = \frac{U}{r_{я} + r_p}, \quad (575)$$

где $I_{нач}$ — начальный пусковой ток электродвигателя;

U — напряжение, приложенное к электродвигателю;

$r_{я}$ — сопротивление якорной обмотки;

r_p — сопротивление пускового реостата.

По мере того как якорь электродвигателя при пуске в ход увеличивает скорость своего вращения, растет противоэлектродвижущая сила в якорной обмотке и соответственно уменьшается величина пускового тока. Необходимость в сопротивлении пускового реостата постепенно отпадает. Поэтому по мере того как якорь электродвигателя увеличивает скорость своего вращения, плавно выводят сопротивление пускового реостата, уменьшая его величину до нуля.

Пусковой реостат бывает под током только во время пуска электродвигателя в ход, так как на продолжительное пребывание под током он не рассчитан.

Процесс пуска в ход электродвигателя обычно исчисляется

долями минуты, во время которых якорь электродвигателя успевает уже развить нормальное число оборотов.

Пример 219. Сопротивление якорной обмотки электродвигателя $r_{я} = 0,1$ ом. Определить, какое сопротивление реостата должно быть введено в начальный момент пуска в ход электродвигателя, чтобы при напряжении $U = 110$ в, приложенном к электродвигателю, величина начального пускового тока не превысила величины $I_{нач} = 50$ а.

Решение. Сопротивление пускового реостата

$$r_p = \frac{U - I_{нач} r_{я}}{I_{нач}} = \frac{110 - 50 \cdot 0,1}{50} = 2,1 \text{ ом.}$$

§ 221. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Реакция якоря электродвигателя — это влияние магнитного поля тока якорной обмотки на режим электродвигателя.

На рис. 483 схематически изображен электродвигатель. Здесь показан якорь с его обмоткой, направление тока в которой показано условными знаками (+) и (·), и два разноименных магнитных полюса N и S , создающих основное магнитное поле электродвигателя.

Согласно правилу левой руки якорь в данном случае вращается против часовой стрелки.

Результирующее магнитное поле электродвигателя представляет собой совокупность двух магнитных полей: основного магнитного поля, создаваемого магнитными полюсами, и магнитного поля, создаваемого током якорной обмотки. У краев магнитных полюсов, на которые набегает якорь при своем вращении, наблюдается усиление магнитного поля, а у краев магнитных полюсов, с которых сбегает якорь, — ослабление полюсов. Действие реакции якоря в электродвигателе сводится к искажению и уменьшению магнитного потока, что наиболее сильно сказывается при больших нагрузках двигателя.

Чтобы избежать искрения под щетками на коллекторе, возникающего в результате реакции якоря, необходимо щетки сместить по окружности коллектора на угол β против движения якоря.

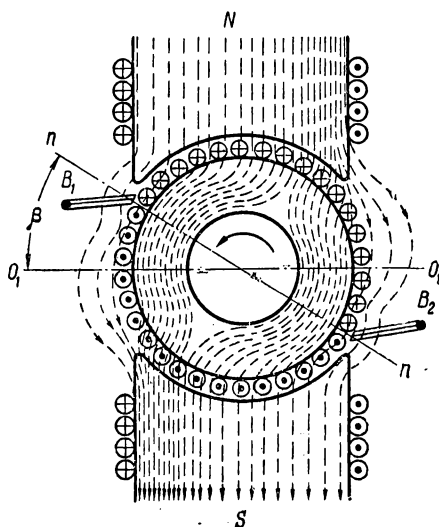


Рис. 483. Реакция якоря электродвигателя

Реакция якоря оказывает вредное влияние на режим работы электродвигателя. Для ослабления этого влияния в электродвигателях применяют дополнительные полюса, магнитное поле которых компенсирует магнитное поле тока якорной обмотки.

§ 222. ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА РЕЖИМ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Если электродвигатель нагрузить, т. е. заставить его приводить в движение какие-либо станки, машины и т. п., то он будет совершать механическую работу, преодолевая сопротивление механической нагрузки. Чем больше механическая нагрузка на электродвигатель, тем большее сопротивление оказывает она вращению электродвигателя и тем больше момент этой силы сопротивления.

Вращающий момент электродвигателя и момент силы сопротивления механической нагрузки взаимно компенсируют друг друга.

Если вращающий момент электродвигателя больше момента сил сопротивления, то электродвигатель увеличивает число своих оборотов до тех пор, пока его момент вращения не уравновесится полностью моментом сил сопротивления. Наоборот, если момент вращения электродвигателя меньше момента сил сопротивления, то скорость вращения электродвигателя начинает снижаться до тех пор, пока момент вращения не уравновесит полностью момента сопротивления.

Таким образом, число оборотов электродвигателя до некоторой степени зависит от величины его механической нагрузки.

С ростом механической нагрузки электродвигателя скорость вращения его уменьшается, что влечет за собой уменьшение противоэлектродвижущей силы в якоре и, следовательно, увеличение тока, потребляемого электродвигателем. Наоборот, с уменьшением механической нагрузки электродвигателя увеличивается число оборотов его якоря, его противоэлектродвижущая сила и уменьшается потребляемый им ток.

Следовательно, величина тока, потребляемого электродвигателем, строго согласована с его механической нагрузкой и регулируется противоэлектродвижущей силой, индуцируемой в обмотке якоря.

При холостом ходе, когда механической нагрузки нет, электродвигатель развивает наибольшую скорость вращения и в соответствии с этим потребляет наименьший ток и наименьшую энергию. Наоборот, если перегрузить электродвигатель, то его скорость вращения может снизиться настолько, что он в конце концов может остановиться. Тогда потребляемый электродвигателем

ток из-за отсутствия противоэлектродвижущей силы стѣнет максимальным и опасным для него.

Автоматическое саморегулирование потребления тока и мощности электродвигателем в связи с изменяющейся механической нагрузкой — очень ценное качество электродвигателя.

Если к якору электродвигателя приложено напряжение U , то при некоторой произвольной механической нагрузке ток в нем равен

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{r_{\text{я}}}, \quad (576)$$

где E — противоэлектродвижущая сила;

$r_{\text{я}}$ — сопротивление обмотки якоря;

$I_{\text{я}}$ — ток в обмотке якоря.

Индуктированная противоэлектродвижущая сила в обмотке якоря пропорциональна числу оборотов якоря n в единицу времени и магнитному потоку Φ , создаваемому электромагнитами:

$$E = cn\Phi, \quad (577)$$

где c — коэффициент пропорциональности.

Подставив в формулу (576) вместо E ее выражение из формулы (577), получим

$$I_{\text{я}} = \frac{U - cn\Phi}{r_{\text{я}}},$$

откуда находим, что

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}r_{\text{я}}}{c\Phi}. \quad (578)$$

Из формулы (578) следует, что скорость вращения якоря электродвигателя увеличивается с увеличением напряжения U на якоре электродвигателя, с уменьшением магнитного потока Φ и величины тока $I_{\text{я}}$ в электродвигателе. Регулировка скорости вращения якоря электродвигателя (числа оборотов якоря в минуту) обычно осуществляется с помощью изменения магнитного потока электродвигателя, что практически достигается изменением тока возбуждения электродвигателя. Чем больше магнитный поток в электродвигателе, тем меньше при всех прочих равных условиях должна быть скорость вращения якоря электродвигателя, чтобы получить необходимую при данной механической нагрузке противоэлектродвижущую силу. Наоборот, чем меньше магнитный поток, тем больше оборотов в минуту должен совершать якорь для достижения той же величины противоэлектродвижущей силы.

Основными величинами, характеризующими работу электродвигателя постоянного тока, являются: напряжение на зажи-

мах U , ток в якоре $I_{я}$, ток возбуждения $i_{в}$, вращающий момент M и число оборотов в минуту n якоря электродвигателя.

Зависимость между какими-либо двумя основными величинами, характеризующими работу электродвигателя, называется характеристикой электродвигателя.

Наиболее важными характеристиками электродвигателей постоянного тока являются: внешние, или, иначе, рабочие, характеристики и регулировочные характеристики.

К внешним характеристикам относятся:

1) зависимость вращающего момента M электродвигателя от тока $I_{я}$ в якоре при постоянстве приложенного к электродвигателю напряжения ($U = \text{const}$) и постоянстве сопротивления его обмотки возбуждения ($r_{в} = \text{const}$);

2) зависимость числа оборотов n якоря электродвигателя в минуту от тока $I_{я}$ в якоре при $U = \text{const}$ и $r_{в} = \text{const}$.

Регулировочной характеристикой электродвигателя постоянного тока называется зависимость тока возбуждения $i_{в}$ от тока $I_{я}$ в якоре при постоянстве напряжения ($U = \text{const}$), приложенного к электродвигателю, и постоянстве числа оборотов якоря ($n = \text{const}$).

В последующих параграфах мы рассмотрим характеристики основных типов электродвигателей постоянного тока.

§ 223. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

В электродвигателе с последовательным возбуждением обмотка возбуждения подключена последовательно к якорной обмотке электродвигателя.

На рис. 484 приведена принципиальная схема электродвигателя с последовательным возбуждением, подключенного к сети постоянного тока. Здесь мы видим, что последовательно с якорной обмоткой электродвигателя соединен пусковой реостат $r_{п}$, с помощью которого осуществляется пуск в ход электродвигателя. Перед началом пуска в ход электродвигателя рычаг пускового реостата установлен на холостом контакте (x, κ). При пуске же в ход электродвигателя этот рычаг переводится на ближайший рабочий контакт, а затем медленно поворачивается до тех пор, пока он не займет положение на последнем рабочем контакте реостата. В этом случае сопротивление пускового реостата будет полностью выведено, а якорь электродвигателя уже разовьет необходимую скорость вращения. При остановке электродвигателя рычаг пускового реостата плавно переводится обратно на холостой контакт и затем размыкается рубильник K .

Параллельно обмотке возбуждения присоединен регулировочный реостат $r_{р}$, с помощью которого можно регулировать скорость вращения якоря электродвигателя. Если, например, необходимо

увеличить число оборотов якоря электродвигателя, то следует уменьшить сопротивление регулировочного реостата. В этом случае ток, проходящий через обмотку возбуждения, уменьшится, а с ним вместе уменьшится магнитный поток Φ электродвигателя, что в свою очередь приведет к росту числа оборотов n в минуту якоря электродвигателя.

Амперметр и вольтметр, включенные в цепь электродвигателя, дают возможность следить за режимом работы электродвигателя.

Вращающий момент электродвигателя. Вращающий момент M электродвигателя постоянного тока зависит от величины тока $I_{я}$, потребляемого электродвигателем, и от магнитного потока Φ электродвигателя:

$$M = KI_{я}\Phi, \quad (579)$$

где K — коэффициент пропорциональности.

Если магнитного насыщения в стали магнитопровода электродвигателя нет, то можно считать, что магнитный поток Φ электродвигателя пропорционален току возбуждения $i_{в}$, т. е.

$$\Phi = K_1 i_{в},$$

где K_1 — коэффициент пропорциональности.

Но так как в электродвигателе с последовательным возбуждением якорная обмотка соединена последовательно с обмоткой возбуждения, то ток возбуждения $i_{в}$ практически равен току $I_{я}$, протекающему через якорную обмотку ($i_{в} = I_{я}$). В соответствии с этим можно считать, что магнитный поток Φ электродвигателя с последовательным возбуждением пропорционален величине тока $I_{я}$, потребляемого электродвигателем, т. е.

$$\Phi = K_1 I_{я}. \quad (580)$$

Подставив в формулу (579) вместо Φ его выражение из формулы (580), получим

$$M = KK_1 I_{я}^2 = K_2 I_{я}^2, \quad (581)$$

где $K_2 = KK_1$ — коэффициент пропорциональности.

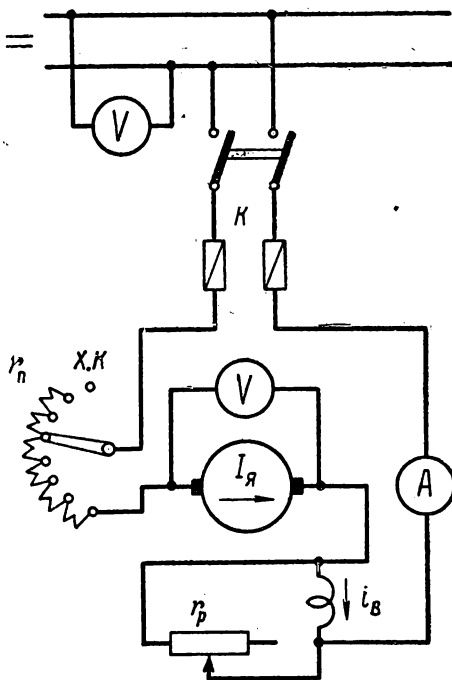


Рис. 484. Принципиальная схема электродвигателя с последовательным возбуждением

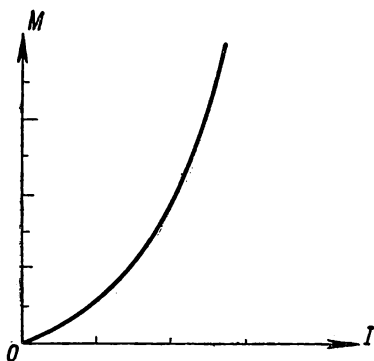


Рис. 485. График зависимости вращающего момента электродвигателя с последовательным возбуждением от величины потребляемого тока

Из формулы (581) следует, что вращающий момент электродвигателя с последовательным возбуждением пропорционален квадрату тока, потребляемого электродвигателем.

На рис. 485 показан график зависимости вращающего момента M электродвигателя с последовательным возбуждением от тока I , потребляемого электродвигателем.

Число оборотов якоря электродвигателя в минуту. Число оборотов в минуту n якоря электродвигателя постоянного тока зависит от величины приложенного к электродвигателю напряже-

ния U , от величины магнитного потока Φ электродвигателя и от тока $I_{я}$, потребляемого электродвигателем:

$$n = \frac{U - I_{я} r_{я}}{c \Phi}, \quad (582)$$

где U — напряжение, приложенное к якорю электродвигателя;
 c — коэффициент пропорциональности.

В рассматриваемом электродвигателе с последовательным возбуждением магнитный поток Φ пропорционален току $I_{я}$, а падение напряжения имеется не только в якорной обмотке электродвигателя ($I_{я} r_{я}$), но и в цепи возбуждения ($i_{в} r_{в} = I_{я} r_{в}$). В соответствии с этим формула для определения скорости вращения якоря электродвигателя с последовательным возбуждением принимает следующий вид:

$$n = \frac{U - I_{я} (r_{я} + r_{в})}{c_1 I_{я}}, \quad (583)$$

где U — напряжение, приложенное к электродвигателю;
 c_1 — коэффициент пропорциональности.

Так как сопротивления обмотки якоря $r_{я}$ и цепи возбуждения $r_{в}$ малы, то падение напряжения в них мало по сравнению с напряжением U , т. е. $I_{я} (r_{я} + r_{в}) \ll U$. Следовательно, формуле по определению числа оборотов якоря электродвигателя можно придать такой приближенный вид:

$$n = \frac{U}{c_1 I_{я}}. \quad (584)$$

Из формулы (584) следует, что число оборотов якоря электродвигателя с последовательным возбуждением практически об-

ратно пропорционально току $I_{я}$, потребляемому электродвигателем.

На рис. 486 показан график зависимости числа оборотов n якоря в минуту электродвигателя с последовательным возбуждением от тока $I_{я}$, потребляемого электродвигателем.

Таким образом, электродвигатель с последовательным возбуждением приспособливается к механической нагрузке. При большой нагрузке он потребляет большой ток и при этом развивает большой вращающий момент и малую скорость вращения своего якоря. Наоборот, при малой механической нагрузке он потребляет малый ток, развивает малый вращающий момент и большую скорость вращения якоря.

Теперь посмотрим, каков режим холостого хода электродвигателя с последовательным возбуждением. Допустим, что с нормально нагруженного электродвигателя внезапно сбрасывается вся механическая нагрузка. Например, электродвигатель с помощью ременной передачи вращал какую-либо машину, а затем в некоторый момент времени приводной ремень соскочил с маховика и электродвигатель, лишенный механической нагрузки, начал работать в режиме холостого хода. В результате сброса механической нагрузки с электродвигателя резко уменьшился момент сил сопротивления движению и, следовательно, вращающий момент стал значительно больше него. Поэтому скорость вращения якоря электродвигателя начинает возрастать. Это будет продолжаться до тех пор, пока вращающий момент не станет равным моменту сил сопротивления движению, т. е. пока не наступит динамическое равновесие в системе электродвигателя и якорь не будет вращаться с равномерной скоростью. Однако состояние динамического равновесия в системе электродвигателя может не наступить. Дело в том, что с уменьшением тока в электродвигателе уменьшается и магнитный поток Φ , создаваемый этим током. А так как при холостом ходе электродвигателя ток, потребляемый им, относительно мал, то и магнитный поток электродвигателя также относительно невелик. Вследствие этого якорь электродвигателя должен развить весьма большое число оборотов в минуту, чтобы установилась та минимальная величина тока, при которой наступает

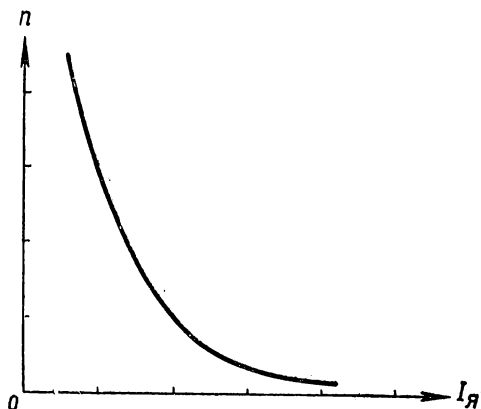


Рис. 486. График зависимости числа оборотов якоря электродвигателя с последовательным возбуждением от величины потребляемого тока (от нагрузки)

динамическое равновесие. Однако обычно такой скорости вращения якорь электродвигателя не достигает, так как при некоторой предельной скорости его вращения происходит разнос электродвигателя, в результате чего электродвигатель выбывает из строя. Отсюда следует сделать практический вывод, что электродвигатель с последовательным возбуждением нельзя запускать вхолостую из-за возможности аварии. Рекомендуется такой электродвигатель жестко сцеплять с механической нагрузкой (например, с помощью муфт), но ни в коем случае не применять гибких передач (например, ремни, канаты, тросы и т. п.), так как при обрыве их электродвигатель переходит в режим холостого хода. Для предупреждения разноса электродвигателя при холостом ходе иногда применяют специальные автоматы, отключающие электродвигатель от сети при некотором предельном числе оборотов его якоря.

Кривые зависимости вращающего момента M (рис. 485) и числа оборотов n якоря в минуту (рис. 486) от тока $I_{\text{я}}$, потребляемого электродвигателем, являются внешними (рабочими) характеристиками электродвигателя.

Внешние характеристики электродвигателя с последовательным возбуждением показывают, что он наиболее пригоден в том случае, когда от электродвигателя требуется большой вращающий момент при малом числе оборотов его якоря в минуту, т. е. при пуске электродвигателя в ход под нагрузкой, и, наоборот, когда требуется относительно малый вращающий момент при номинальной скорости вращения якоря. В силу этого электродвигатели с последовательным возбуждением нашли широкое применение на электровозах, в моторных трамвайных вагонах, кранах, подъемниках и т. п.

§ 224. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

В электродвигателе с параллельным возбуждением обмотка возбуждения подключена параллельно якорной обмотке.

На рис. 487 приведена схема электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением, подключенного к сети постоянного тока.

Чтобы пусковой вращающий момент электродвигателя был достаточной величины, необходимо при пуске в ход электродвигателя получить в нем большой магнитный поток, так как вращающий момент электродвигателя пропорционален величине магнитного потока Φ . С этой целью рекомендуется обмотку возбуждения электродвигателя подключать непосредственно к сети, т. е. до пускового реостата. Для этого пусковой реостат $r_{\text{п}}$ снабжен металлической дугообразной пластиной, по которой скользит ры-

чаг реостата при своем повороте. Эта пластина присоединена одним своим концом к началу пускового реостата, а другим — к одному из концов обмотки возбуждения. Нетрудно видеть, что независимо от положения рычага пускового реостата (кроме положения на холостом контакте) всякий раз цепь возбуждения подключена под полное напряжение сети.

При пуске в ход электродвигателя рычаг пускового реостата находится на холостом контакте (х. к.). В результате этого электродвигатель отключен от сети. Пуск в ход электродвигателя осуществляется плавным поворотом рычага пускового реостата до тех пор, пока он не перейдет на последний рабочий контакт электродвигателя.

Последовательно с обмоткой возбуждения электродвигателя включен регулировочный реостат r_p , с помощью которого можно изменять ток возбуждения i_b и, следовательно, магнитный поток Φ электродвигателя и соответственно число оборотов в минуту n якоря электродвигателя.

Вращающий момент электродвигателя. Вращающий момент электродвигателя с параллельным возбуждением зависит от величины тока I , потребляемого электродвигателем, и от величины магнитного потока Φ электродвигателя.

Если цепь возбуждения электродвигателя имеет постоянное сопротивление, $r_b = \text{const}$ и к этой цепи приложено постоянное напряжение $U = \text{const}$, то ток возбуждения является постоянным по величине, т. е.

$$i_b = \frac{U}{r_b} = \text{const.}$$

В этом случае и магнитный поток Φ электродвигателя также является постоянным по величине, т. е.

$$\Phi = K_1 i_b,$$

где K_1 — коэффициент пропорциональности.

В соответствии с этим вращающий момент электродвигателя с параллельным возбуждением можно определить по формуле

$$M = K_1 \Phi I_a = K_2 I_a, \quad (585)$$

где $K_2 = K_1 \Phi = \text{const}$ — коэффициент пропорциональности.

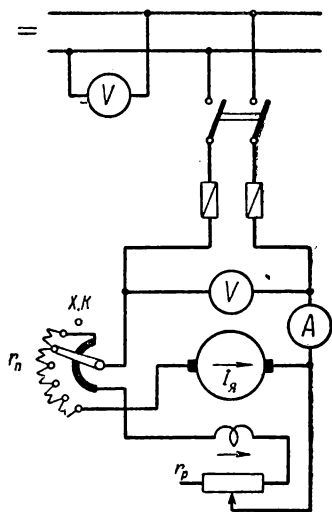


Рис. 487. Схема включения электродвигателя с параллельным возбуждением в сеть постоянного тока

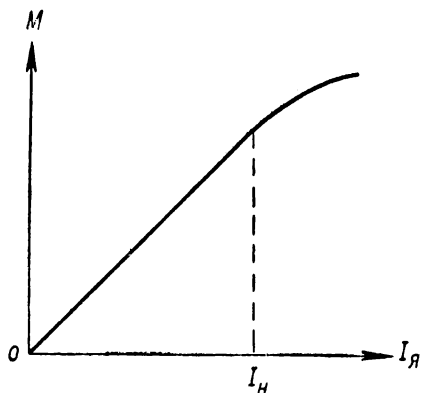


Рис. 488. График зависимости вращающего момента электродвигателя с параллельным возбуждением от нагрузки (от величины тока)

характеристика) вращающего момента M электродвигателя с параллельным возбуждением от тока $I_{я}$ в якоре электродвигателя.

Число оборотов якоря электродвигателя в минуту. Число оборотов якоря электродвигателя в минуту определяется по формуле

$$n = \frac{U - I_{я} r_{я}}{c \Phi}.$$

Если напряжение, приложенное к электродвигателю, и магнитный поток в нем постоянны по величине ($U = \text{const}$ и $\Phi = \text{const}$), то, как это видно из формулы, число оборотов n якоря электродвигателя в минуту зависит от величины падения напряжения $I_{я} r_{я}$ в якорной обмотке. Но так как сопротивление $r_{я}$ этой обмотки обычно относительно мало, то и падение напряжения в ней мало. Отсюда следует, что зависимость числа оборотов якоря электродвигателя от нагрузки очень незначительна. Опытным установлено, что число оборотов якоря электродвигателя в минуту

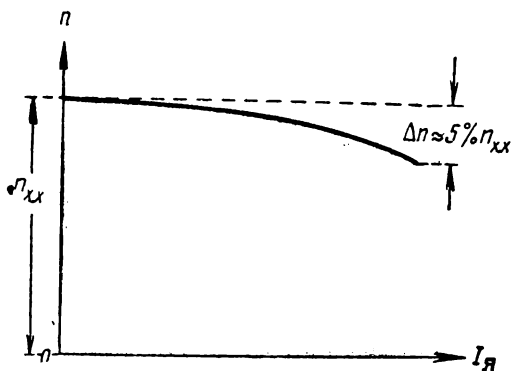


Рис. 489. График зависимости числа оборотов якоря электродвигателя с параллельным возбуждением от нагрузки (величины тока)

уменьшается с ростом механической нагрузки от холостого хода до нормальной нагрузки в среднем примерно на 5%.

На рис. 489 приведен график изменения числа оборотов в минуту n якоря электродвигателя с параллельным возбуждением в зависимости от тока $I_{я}$, потребляемого якорем.

Электродвигатель с параллельным возбуждением при пуске в ход развивает малый вращающий момент и, следовательно, не может сразу справиться с большой механической нагрузкой, а поэтому его вначале запускают на холостой ход. Так как магнитный поток электродвигателя при холостом ходе относительно велик, то якорь электродвигателя не может развить чрезмерно большое число оборотов в минуту и опасность разброса электродвигателя отпадает. После того как якорь разовьет при холостом ходе нужное число оборотов в минуту и вращающий момент электродвигателя достигнет требуемой величины, на электродвигатель дают механическую нагрузку.

▼ Скорость вращения якоря электродвигателя можно регулировать двояким способом: изменением напряжения и изменением тока возбуждения электродвигателя.

Если в формуле

$$n = \frac{U - I_{я}r_{я}}{c\Phi}$$

положить, что $\Phi = \text{const}$ и $I_{я}r_{я} \ll U$,
то можно написать, что

$$n = \frac{U}{c}, \quad (586)$$

где c — постоянная величина.

Из формулы (586) следует, что скорость вращения якоря электродвигателя с параллельным возбуждением пропорциональна напряжению, приложенному к электродвигателю.

Регулировку числа оборотов якоря электродвигателя с помощью изменения напряжения на его зажимах можно осуществить путем поглощения части его реостатом, включенным последовательно с якорной обмоткой. Однако этот способ нельзя назвать рациональным, так как он связан с относительно большой потерей мощности в реостате.

Более рациональный способ регулирования скорости вращения якоря заключается в изменении тока возбуждения электродвигателя с помощью регулировочного реостата, включенного в цепь возбуждения.

Если при постоянстве возбуждения на зажимах электродвигателя ($U = \text{const}$) и постоянном моменте сил сопротивления начать увеличивать ток возбуждения электродвигателя, то скорость вращения якоря электродвигателя начнет уменьшаться. Это объясняется тем, что при увеличении тока возбуждения уве-

личивается магнитный поток Φ электродвигателя. Следовательно, для того чтобы получить в якоре необходимую противоэлектродвижущую силу, соответствующую данной механической нагрузке, необходимо его якору развивать меньшее число оборотов в минуту, так как

$$E = cn\Phi$$

и

$$n = \frac{E}{c\Phi}. \quad (587)$$

Наоборот, если ток возбуждения уменьшить, то уменьшится магнитный поток и в соответствии с этим согласно формуле (587) увеличится скорость вращения якоря электродвигателя.

✓ Итак, с увеличением тока возбуждения электродвигателя с параллельным возбуждением скорость вращения якоря электродвигателя уменьшается, а с уменьшением тока возбуждения — увеличивается.

Если электродвигатель с параллельным возбуждением работает на холостом ходу, то чрезмерное уменьшение тока возбуждения и соответственно магнитного потока в электродвигателе может привести к чрезмерно большой скорости вращения якоря. Особенно опасен тот случай, когда при холостом ходе электродвигателя происходит обрыв обмотки возбуждения. Тогда магнитный поток в электродвигателе достигает минимальной возможной величины, так как он в этом случае создается остаточным магнетизмом, а число оборотов электродвигателя в минуту достигает такой величины, при которой произойдет механическая авария с электродвигателем.

Изменение направления вращения якоря электродвигателя с параллельным возбуждением достигается путем переключения концов обмотки возбуждения. В этом случае изменяется направление магнитного потока в электродвигателе, в то время как направление тока в якорной обмотке остается неизменным. Следовательно, механическая сила, действующая на якорные проводники с током, изменит свое направление на противоположное, что заставит якорь вращаться в противоположную сторону.

Рассмотренные нами внешние (рабочие) характеристики электродвигателя с параллельным возбуждением показывают, что данный тип электродвигателя удобен в эксплуатации там, где требуется постоянство числа оборотов якоря электродвигателя и не требуется большого вращающего момента электродвигателя при его пуске в ход. В силу этого электродвигатели постоянного тока с параллельным возбуждением нашли широкое применение для обслуживания станков, трансмиссий, вентиляторов и вообще механизмов, работающих фактически при постоянном числе оборотов в единицу времени.

§ 225. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Электродвигатель со смешанным возбуждением имеет две обмотки возбуждения: одну параллельную, а другую последовательную.

На рис. 490 показана схема включения электродвигателя со смешанным возбуждением в сеть постоянного тока.

Рабочие характеристики электродвигателя со смешанным возбуждением определяются тем, действие какой из обмоток возбуждения, параллельной или последовательной, преобладает. Если основной магнитный поток создается главным образом параллельной обмоткой, то рабочие характеристики электродвигателя близки к характеристикам электродвигателя с параллельным возбуждением, и, наоборот, эти характеристики будут совпадать с характеристиками электродвигателя с последовательным возбуждением, если магнитный поток создается главным образом последовательной обмоткой возбуждения. Сочетание параллельной и последовательной обмоток в электродвигателе смешанного возбуждения обычно подбирают такое, чтобы характеристики его были наиболее удобными для данной специфической нагрузки.

Обычно электродвигатели со смешанным возбуждением применяются там, где нагрузка резко неравномерная, например, при работе экскаваторов, поршневых насосов, лебедок, кранов и т. п. В самом деле, когда ковш экскаватора заполнен грузом, то требуются большой вращающий момент и малое число оборотов двигателя (характеристика двигателя с последовательным возбуждением), а когда ковш экскаватора освободится от груза, необходимы нормальное постоянство числа оборотов в единицу времени и относительно небольшой вращающий момент (характеристика двигателя с параллельным возбуждением).

Если для экскаватора применить электродвигатель с последовательным возбуждением, то он будет удобен в моменты подъема груза и крайне неудобен, когда экскаватор освобождается от груза, так как в этом случае электродвигатель разовьет очень большую скорость вращения (режим, приближающийся к холостому ходу). Если же для обслуживания экскаватора приспособо-

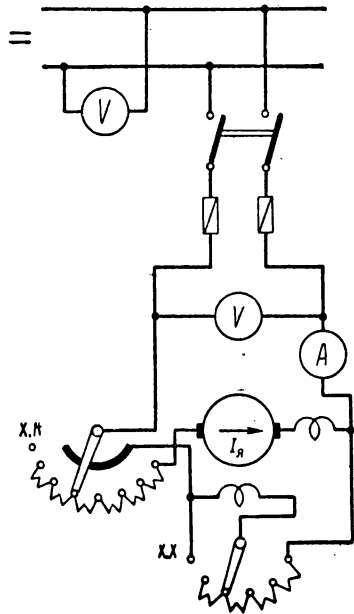


Рис. 490. Схема включения электродвигателя со смешанным возбуждением в сеть постоянного тока

бить двигатель с параллельным возбуждением, то он не сможет развить необходимого вращающего момента при поднятии груза экскаватором (при малом числе оборотов в единицу времени). Постоянство оборотов в минуту якоря электродвигателя с параллельным возбуждением служит препятствием для нормальной работы его по обслуживанию экскаватора.

Из рассмотренного примера ясно, что для нормальной работы экскаватора необходимо применить такой электродвигатель со смешанным возбуждением, который сможет дать при малом числе оборотов якоря в минуту большой вращающий момент и нормальное число оборотов при холостом ходе.

Иногда в электродвигателях со смешанным возбуждением устраиваются приспособления, дающие возможность по желанию выключать ту или иную обмотку возбуждения, т. е. переключать его на схему электродвигателя с последовательным и с параллельным возбуждением.

ГЛАВА XXXVII

ГЕНЕРАТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 226. УСТРОЙСТВО СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

В генераторах переменного тока используется принцип электромагнитной индукции. По своей конструкции они подразделяются: на генераторы с вращающимися полюсами и неподвижным якорем и генераторы с неподвижными магнитными полюсами и подвижным якорем.

Наибольшее распространение получили генераторы с вращающимися магнитными полюсами и неподвижным якорем. Это понятно, так как благодаря неподвижности якорной обмотки отпадают технические затруднения, связанные с использованием скользящих контактов при больших напряжениях, снимаемых с якорной обмотки генератора.

На рис. 491 показана принципиальная схема однофазного генератора переменного тока с неподвижным якорем и подвижными магнитными полюсами.

Подвижная часть генератора переменного тока называется ротором, а неподвижная — статором.

Статоры собираются из отдельных изолированных друг от друга железных листов. На внутренней поверхности статора имеются продольные пазы, в которые укладываются провода якорной обмотки \mathcal{Z} генератора.

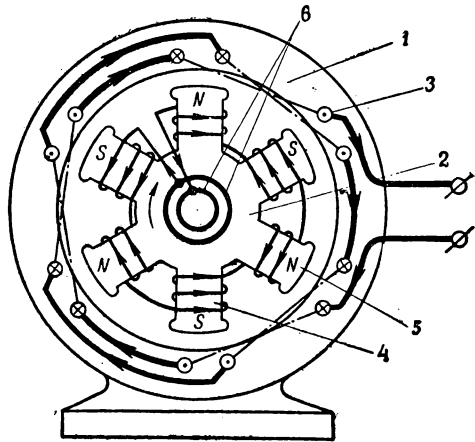


Рис. 491. Принципиальная схема однофазного генератора переменного тока с неподвижным якорем и подвижными магнитными полюсами

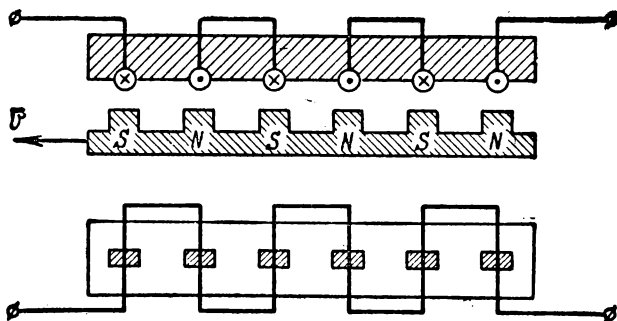


Рис. 492. Развертка якорной обмотки и магнитных полюсов однофазного генератора переменного тока.

Якорная обмотка 3 генератора состоит из медных изолированных стержней или проводов, уложенных в пазы статора и соединенных друг с другом. На рис. 491 показаны в разрезе плоскости чертежа проводники якорной обмотки. Направления индуктированной электродвижущей силы в них обозначены обычными условными символами (+) и (-).

Развертка якорной обмотки и магнитных полюсов однофазного генератора показана на рис. 492. Направления электродвижущей силы и относительного движения магнитных полюсов здесь обозначены соответствующими стрелками.

Ротор генератора изготовляется обычно из сплошного железа, так как он синхронно вращается со своим магнитным полем и поэтому в нем не могут индуктироваться вихревые токи.

Полюсные наконечники 5 магнитных полюсов 4 ротора обычно собираются из листового железа, так как в воздушном зазоре, где они перемещаются, имеется магнитное поле, создаваемое током якорной обмотки, которое в полюсных наконечниках индуктирует вихревые токи.

Ротор 2, изображенный на рис. 491, имеет шесть явно выраженных магнитных полюсов 4, из которых каждые два соседних полюса разноименные.

На сердечники полюсов посажены катушки возбуждения, питаемые постоянным током. Этот ток подводится с помощью щеток к контактным кольцам 6, сидящим на валу генератора.

По способу возбуждения генераторы переменного тока делятся на три основных типа:

1) генераторы, обмотки возбуждения которых питаются постоянным током от постороннего источника электрической энергии, например от аккумуляторной батареи;

2) генераторы, обмотки возбуждения которых питаются постоянным током от постороннего генератора постоянного тока

малой мощности, сидящего на одном валу с обслуживаемым им генератором;

3) генераторы, обмотки возбуждения которых питаются током самих же этих генераторов, предварительно выпрямленным с помощью сухих выпрямителей; генераторы подобного рода называются генераторами с самовозбуждением.

Генераторы переменного тока с явно выраженными полюсами рассчитаны на относительно небольшое номинальное число оборотов ротора в минуту, не превышающее 1000 об/мин. Поэтому их обычно спаривают с тихоходными первичными двигателями, например с гидротурбинами. Генераторы подобного рода обычно называют гидрoгенераторами.

Генераторы переменного тока с неявно выраженными полюсами (рис. 493) рассчитаны на относительно большое номинальное число оборотов в минуту (1500—3000 об/мин). Поэтому их обычно спаривают с быстроходными первичными двигателями, например с паровыми турбинами. Генераторы подобного рода обычно называют турбогенераторами.

XX съезд партии в своих директивах по развитию народного хозяйства СССР на шестую пятилетку поставил задачу выпустить генераторы мощностью до 300 тысяч киловатт с новой системой водородного охлаждения.

Генераторы трехфазного тока имеют на своем статоре три фазные обмотки, размещенные так, что в них индуцируются электродвижущие силы, сдвинутые по фазе относительно друг друга на угол $2/3\pi$.

Начала и концы фазных обмоток трехфазного генератора соединены так, что они образуют трехфазную систему, соединенную «звездой» или «треугольником».

На рис. 494 приведена схема развертки части якорной обмотки трехфазного генератора и магнитных полюсов. Направления электродвижущих сил в фазных обмотках генератора и относительного движения магнитных полюсов здесь показаны соответствующими стрелками.

Полюсным наконечникам магнитных полюсов ротора генератора обычно придают такую форму, при которой в проводниках статорной обмотки индуцируется синусоидальная электродвижущая сила.

Если ротор генератора двухполюсный, то за один его полный оборот индукти-

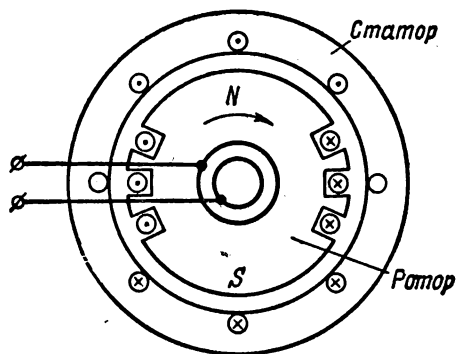


Рис. 493. Схематическое изображение генератора переменного тока с неявно выраженными полюсами ротора

рованная электродвижущая сила генератора совершит полный цикл своих изменений. Следовательно, частота электродвижущей силы такого генератора будет равна

$$f = \frac{n}{60}, \quad (588)$$

где f — частота в герцах;
 n — число оборотов ротора в минуту.

Если генератор имеет число пар полюсов p , то соответственно этому частота электродвижущей силы такого генератора будет в p раз больше частоты электродвижущей силы двухполюсного генератора:

$$f = \frac{pn}{60}. \quad (589)$$

Пример 220. Требуется определить частоту электродвижущей силы генератора переменного тока, если ротор генератора развивает $n = 3000$ об/мин, а число пар полюсов генератора $p = 1$.

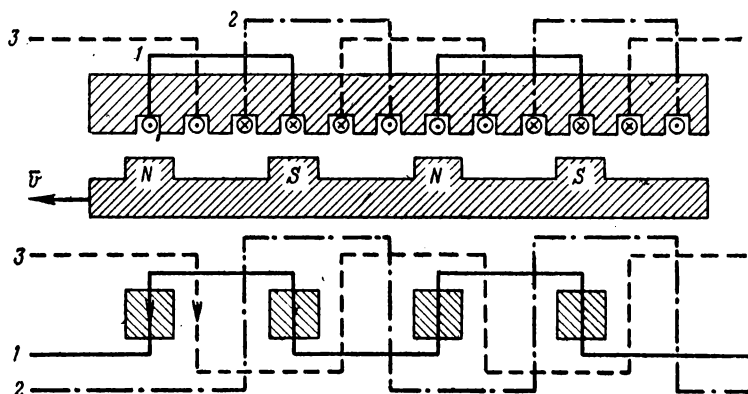


Рис. 494. Развертка части якорной обмотки и магнитных полюсов трехфазного генератора

Решение. Применяя формулу (589), найдем

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{1 \cdot 3000}{60} = 50 \text{ гц.}$$

Из формулы (589) следует, что частота электродвижущей силы генератора находится в строго определенной зависимости от числа оборотов ротора генератора в минуту. Генераторы переменного тока, частота электродвижущей силы которых находится в строго определенной зависимости от скорости вращения ротора его, называются **синхронными генераторами.**

В отличие от синхронных генераторов в технике переменных токов имеются электрические машины, для которых нет строгой зависимости частоты электродвижущей силы (тока) от числа оборотов ротора машины. Электрические машины подобного рода называются асинхронными электрическими машинами переменного тока. Последние обычно применяются как электродвигатели переменного тока. С ними мы более подробно ознакомимся несколько ниже.

§ 227. РЕЖИМ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Основными величинами, характеризующими синхронный генератор, являются: напряжение на зажимах U , нагрузка I , полная мощность P_i (к $ва$), число оборотов ротора в минуту n , коэффициент мощности $\cos \varphi$.

Важнейшие рабочие характеристики синхронного генератора следующие:

- 1) характеристика холостого хода;
- 2) внешняя характеристика;
- 3) регулировочная характеристика.

Характеристика холостого хода. Электродвижущая сила генератора пропорциональна величине магнитного потока Φ , создаваемого током возбуждения i_v , и числу оборотов n ротора генератора в минуту:

$$E = cn\Phi, \quad (590)$$

где c — коэффициент пропорциональности.

Хотя величина электродвижущей силы синхронного генератора зависит от числа оборотов n ротора, регулировать ее путем изменения скорости вращения ротора невозможно, так как с числом оборотов ротора генератора связана частота электродвижущей силы, которая должна быть сохранена постоянной.

Следовательно, остается единственный способ регулировки величины электродвижущей силы синхронного генератора — это изменение основного магнитного потока Φ . Последнее обычно достигается путем регулирования тока возбуждения i_v с помощью реостата, введенного в цепь возбуждения генератора. В том случае когда обмотка возбуждения питается током от генератора постоянного тока, сидящего на одном валу с данным синхронным генератором, ток возбуждения синхронного генератора регулируется изменением напряжения на зажимах генератора постоянного тока.

Зависимость электродвижущей силы E синхронного генератора от тока возбуждения i_v при постоянстве номинальной скорости вращения ротора ($n = \text{const}$) и нагрузке, равной нулю ($I = 0$), называется характеристикой холостого хода генератора.

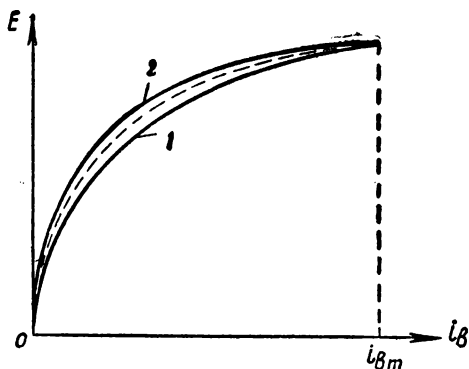


Рис. 495. Характеристика холостого хода синхронного генератора

На рис. 495 приведена характеристика холостого хода синхронного генератора. Здесь восходящая ветвь 1 кривой снята при возрастании тока i_B от нуля до i_{Bm} , а нисходящая ветвь 2 кривой — при изменении i_B от i_{Bm} до $i_B = 0$. Несовпадение восходящей 1 и нисходящей 2 ветвей объясняется остаточным магнетизмом. Чем больше площадь, ограниченная этими ветвями, тем больше потеря энергии

в стали синхронного генератора на перемагничивание.

Крутизна подъема кривой холостого хода на ее начальном прямолинейном участке характеризует магнитную цепь синхронного генератора. Чем меньше расход ампер-витков в воздушных зазорах генератора, тем при прочих одинаковых условиях будет круче характеристика холостого хода генератора.

Внешняя характеристика генератора. Напряжение на зажимах нагруженного синхронного генератора зависит от электродвижущей силы E генератора, от падения напряжения в активном сопротивлении его статорной обмотки, падения напряжения, обусловленного электродвижущей силой самоиндукции рассеяния E_S , и падения напряжения, обусловленного реакцией якоря.

Электродвижущая сила рассеяния E_S , как известно, зависит от магнитного потока рассеяния Φ_S , который не проникает в магнитные полюса ротора генератора и, следовательно, не изменяет степени намагничивания генератора. Электродвижущая сила самоиндукции рассеяния E_S генератора относительно мала, а поэтому практически ею можно пренебречь. В соответствии с этим ту часть электродвижущей силы генератора, которая компенсирует электродвижущую силу самоиндукции рассеяния E_S , можно считать практически равной нулю.

Реакция якоря оказывает более заметное влияние на режим работы синхронного генератора и, в частности, на величину напряжения на его зажимах. Степень этого влияния зависит не только от величины нагрузки генератора, но и от характера нагрузки.

Рассмотрим вначале влияние реакции якоря синхронного генератора для случая, когда нагрузка генератора носит чисто активный характер. Для этой цели возьмем часть схемы работающего синхронного генератора, изображенную на рис. 496,а. Здесь показаны часть статора с одним активным проводником якорной обмотки и часть ротора с несколькими его магнитными полюса-

ми. В рассматриваемый момент времени северный полюс одного из электромагнитов, вращающихся вместе с ротором против часовой стрелки, как раз проходит под активным проводником статорной обмотки. Электродвижущая сила, индуцированная в этом проводнике, направлена к нам из-за плоскости рисунка. А так как нагрузка генератора носит чисто активный характер, то ток I в якорной обмотке совпадает по фазе с электродвижущей силой. Следовательно, в активном проводнике статорной обмотки ток течет к нам из-за плоскости рисунка. Магнитные линии поля, создаваемого электромагнитами, показаны здесь сплошными линиями, а магнитные линии поля, создаваемого током провода якорной обмотки, — пунктирной линией. Внизу на рис. 496,а показана векторная диаграмма магнитной индукции результирующего магнитного поля, находящегося над северным полюсом электромагнита. Здесь мы видим, что магнитная индукция \vec{B} основного магнитного поля, создаваемого электромагнитом, имеет радиальное направление, а магнитная индукция $\vec{B}_я$ магнитного поля тока якорной обмотки направлена вправо и перпендикулярно вектору \vec{B} . Результирующая магнитная индукция $\vec{B}_{рез}$ направлена вверх и вправо. Это значит, что в результате сложения магнитных полей произошло некоторое искажение основного магнитного поля. Слева от северного полюса оно несколько ослабилось, а справа — несколько усилилось. Нетрудно видеть, что радиальная составляющая вектора результирующей магнитной индукции, от которой по сути дела зависит величина индуцированной электродвижущей силы генератора, не изменилась. Следовательно, реакция якоря при чисто активной нагрузке генератора не влияет на величину электродвижущей силы генератора. Это значит, что и падение напряжения в генераторе при чисто активной нагрузке обусловлено только падением напряжения в активном сопротивлении генератора, если пренебречь электродвижущей силой самоиндукции рассеяния.

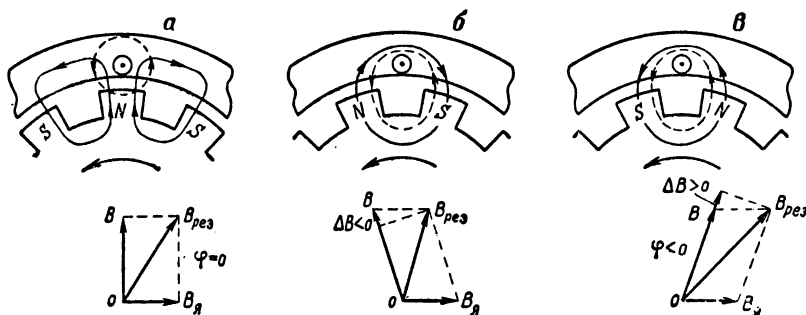


Рис. 496. Влияние реакции якоря для нагрузок:
 а — активного; б — индуктивного; в — емкостного характера

Теперь допустим, что нагрузка синхронного генератора носит чисто индуктивный характер. В этом случае ток I отстает по фазе от электродвижущей силы E на угол $\frac{\pi}{2}$. Это значит, что максимум тока возникает в проводе несколько позднее, чем максимум электродвижущей силы. Следовательно, когда в проводе якорной обмотки ток достигнет максимального значения, северный полюс N будет уже не под этим проводом, а сместится несколько дальше в направлении вращения ротора, как это показано на рис. 496,б. В этом случае магнитные линии (пунктирные линии) магнитного потока якорной обмотки замыкаются через два соседних разноименных полюса N и S и направлены навстречу магнитным линиям основного магнитного поля генератора, создаваемого магнитными полюсами. Это приводит к тому, что основное магнитное поле не только искажается, но и делается несколько слабее. На рис. 496,б приведена векторная диаграмма магнитных индукций: основного магнитного поля \vec{B} , магнитного поля, обусловленного реакцией якоря $\vec{B}_я$, и результирующего магнитного поля $\vec{B}_{рез}$. Здесь мы видим, что радиальная составляющая магнитной индукции результирующего магнитного поля стала меньше магнитной индукции B основного магнитного поля на величину ΔB . Следовательно, стала меньше и индуктированная электродвижущая сила, так как она обусловлена радиальной составляющей магнитной индукции. А это значит, что напряжение на зажимах генератора при всех прочих равных условиях будет меньше, чем напряжение при чисто активной нагрузке генератора.

Если генератор имеет нагрузку чисто емкостного характера, то ток в нем опережает по фазе электродвижущую силу на угол $\frac{\pi}{2}$. Ток в проводниках якорной обмотки генератора теперь достигает максимума раньше, чем электродвижущая сила E . Следовательно, когда в проводе якорной обмотки (рис. 496,в) ток достигнет максимального значения, северный полюс N еще не подойдет под этот провод. В этом случае магнитные линии (пунктирные линии) магнитного потока якорной обмотки замыкаются через два соседних разноименных полюса N и S и направлены попутно с магнитными линиями основного магнитного поля генератора. Это приводит к тому, что основное магнитное поле генератора не только искажается, но и несколько усиливается. На рис. 496,в приведена векторная диаграмма магнитной индукции: основного магнитного поля \vec{B} , магнитного поля, обусловленного реакцией якоря $B_я$, и результирующего магнитного поля $B_{рез}$. Мы видим, что радиальная составляющая магнитной индукции результирующего магнитного поля стала больше магнитной индукции B основного магнитного поля на величину ΔB . Следовательно, увеличилась и индуктированная электродвижущая

щая сила генератора. А это значит, что напряжение на зажимах генератора при всех прочих одинаковых условиях станет больше, чем напряжение при чисто индуктивной нагрузке генератора.

Выяснив влияние реакции якоря на электродвижущую силу синхронного генератора при различных по своему характеру нагрузках, перейдем к выяснению внешней характеристики генератора.

Внешней характеристикой синхронного генератора называется зависимость напряжения U на его зажимах от нагрузки I при постоянной скорости вращения ротора ($n = \text{const}$), постоянстве тока возбуждения ($i_a = \text{const}$) и постоянстве коэффициента мощности ($\cos \varphi = \text{const}$).

На рис. 497 приведены внешние характеристики синхронного генератора для различных по своему характеру нагрузок. Кривая 1 выражает внешнюю характеристику при активной нагрузке ($\cos \varphi = 1,0$). В этом случае напряжение на зажимах генератора падает при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной в пределах 10—20% напряжения при холостом ходе генератора. Кривая 2 выражает внешнюю характеристику при активно-индуктивной нагрузке ($\cos \varphi = 0,8$). В этом случае напряжение на зажимах генератора падает быстрее из-за размагничивающего действия реакции якоря. При изменении нагрузки генератора от холостого хода до номинальной напряжение уменьшается в пределах 20—30% напряжения при холостом ходе. Кривая 3 выражает внешнюю характеристику синхронного генератора при активно-емкостной нагрузке ($\cos \varphi = 0,8$). В этом случае напряжение на зажимах генератора несколько растет из-за намагничивающего действия реакции якоря.

Регулировочная характеристика синхронного генератора выражает зависимость тока возбуждения i_a генератора от нагрузки I при постоянстве действующего значения напряжения на зажимах генератора ($U = \text{const}$), постоянстве числа оборотов ротора генератора в минуту ($n = \text{const}$) и постоянстве коэффициента мощности ($\cos \varphi = \text{const}$).

На рис. 498 приведены три регулировочные характеристики синхронного генератора. Кривая 1 относится к случаю активной

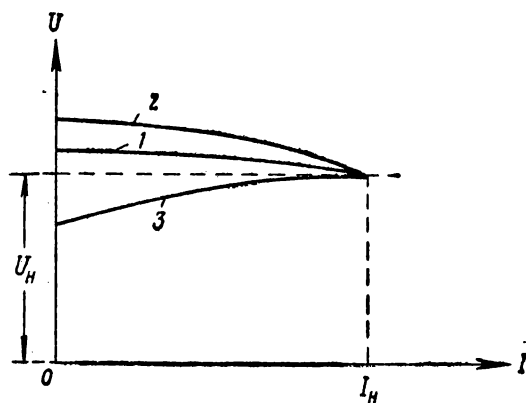


Рис. 497. Внешние характеристики генератора переменного тока для различных нагрузок

(1 — активной, 2 — индуктивной и 3 — емкостной)

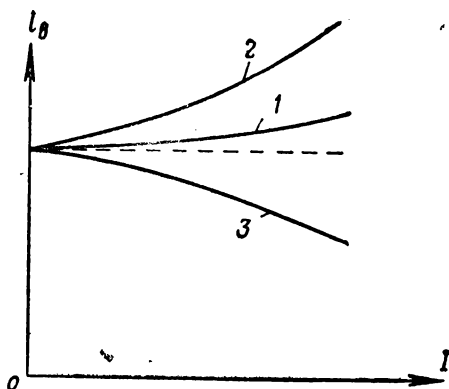


Рис. 498. Регулировочные характеристики генератора переменного тока для различных нагрузок (*1* — активной, *2* — индуктивной и *3* — емкостной)

чем кривая *1*, вследствие размагничивающего действия реакции якоря, снижающего величину электродвижущей силы *E*, и, следовательно, напряжение *U* на зажимах генератора. Кривая *3* относится к случаю активно-емкостной нагрузки при $\cos \varphi = 0,8$. Эта кривая показывает, что с ростом нагрузки генератора требуется меньший ток возбуждения i_v генератора для поддержания постоянства напряжения на его зажимах. Это понятно, так как в этом случае реакция якоря усиливает основной магнитный поток и, следовательно, способствует увеличению электродвижущей силы генератора и напряжения на его зажимах.

нагрузки ($\cos \varphi = 1$). Здесь мы видим, что с ростом нагрузки *I* генератора ток возбуждения растет. Это понятно, так как с ростом нагрузки *I* увеличивается падение напряжения в активном сопротивлении якорной обмотки генератора и требуется увеличить электродвижущую силу *E* генератора путем увеличения тока возбуждения J_v , чтобы сохранить постоянство напряжения *U*. Кривая *2* относится к случаю активно-индуктивной нагрузки при $\cos \varphi = 0,8$. Эта кривая поднимается круче,

§ 228. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Синхронные генераторы соединяются друг с другом параллельно для совместной работы на общую электрическую сеть. В те часы суток, когда нагрузка электрической станции мала, работает часть ее генераторов, а затем по мере роста нагрузки включаются и резервные генераторы. Такой способ эксплуатации генераторов выгоден в том отношении, что каждый из них работает на полную мощность и, следовательно, с наибольшим коэффициентом полезного действия.

Рассмотрим, каков порядок подключения на параллельную работу однофазных синхронных генераторов и как они работают на общую электрическую сеть.

Допустим, что однофазный синхронный генератор, который назовем генератором № 1, работает на полную нагрузку *I* и в силу этого возникла необходимость подключения к нему на параллельную работу генератора № 2 (рис. 499). Основное требование, которое должно быть выполнено при подключении, сводится к следующему: **в момент подключения генератора № 2 к**

распределительным шинам его электродвижущая сила должна быть численно равна напряжению на этих шинах, находиться с ним в противофазе и иметь одинаковую с ним частоту, т. е.

$$|E_2| = |U|, \quad e_2 = -u,$$

$$\text{или, иначе, } E_{2m} \cdot \sin \omega t = -U_m \cdot \sin \omega t,$$

где e_2 — мгновенное значение электродвижущей силы генератора № 2;

u — мгновенное значение напряжения на распределительных шинах.

Если это требование не будет выполнено, то из сети (от генератора № 1) может пойти большой ток в генератор № 2 и последний начнет работать в режиме электродвигателя, что приведет к аварии.

Прибор, с помощью которого можно правильно определить момент подключения генератора к распределительным шинам на параллельную работу, называется синхроскопом. В простейшем случае синхроскоп состоит из двух электрических ламп L_1 и L_2 , включенных в провода, соединяющие генератор с распределительными шинами (рис. 499).

Посмотрим, каким же образом, пользуясь синхроскопом, можно подключить генератор № 2 к распределительным шинам на параллельную работу с генератором № 1.

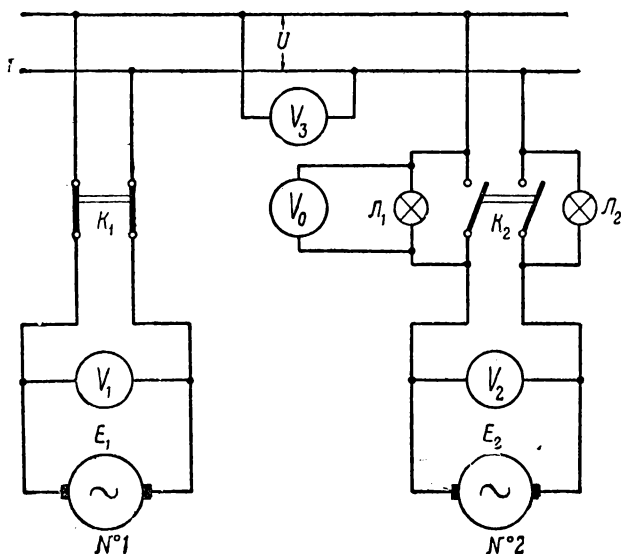


Рис. 499. Схема параллельного включения однофазных генераторов переменного тока

Вначале с помощью первичного двигателя приводят во вращение ротор генератора № 2, добиваясь того, чтобы он развил номинальное число оборотов в минуту. В этом случае частота электродвижущей силы генератора № 2 практически будет равна частоте электродвижущей силы генератора № 1.

После этого в генераторе № 2 устанавливают ток возбуждения такой величины, чтобы показания вольтметров V_2 и V_3 были одинаковыми. В этом случае величины электродвижущей силы генератора № 2 и напряжения U на распределительных шинах практически будут равны.

Затем добиваются того, чтобы электродвижущая сила генератора № 2 и напряжение U на распределительных шинах были в противофазе. Для этой цели изменяют в весьма небольших пределах скорость вращения ротора генератора № 2 и при этом наблюдают за лампами синхроскопа.

Если скорости вращения роторов генераторов № 1 и № 2 значительно различаются, то электродвижущая сила генератора № 2 и напряжение на распределительных шинах не компенсируют полностью друг друга. В этом случае напряжение на лампах синхроскопа не равно нулю и лампы светятся.

При постепенном приближении скорости вращения ротора генератора № 2 к скорости вращения ротора генератора № 1 наступает такой момент, когда лампы синхроскопа начинают мигать, т. е. то потухать, то вновь зажигаться. Чем меньше различаются частоты генераторов № 1 и № 2, тем реже мигают лампы.

Так как лампы синхроскопа тухнут при напряжении, не равном нулю, то их потухание еще не является полным подтверждением того, что момент подключения генератора № 2 наступил. Поэтому к одной из ламп синхроскопа параллельно подключается так называемый нулевой вольтметр V_0 .

Когда лампы синхроскопа начнут мигать очень редко, потухая примерно на 3—5 секунд, то в один из очередных моментов потухания их, когда нулевой вольтметр V_0 покажет напряжение, практически равное нулю, замыкают рубильник K_2 и, следовательно, подключают генератор № 2 к распределительным шинам.

Если после подключения генератора № 2 к распределительным шинам окажется, что скорость вращения его ротора несколько меньше номинальной, т. е. частота электродвижущей силы генератора меньше частоты напряжения на распределительных шинах, то из сети в генератор № 2 пойдет небольшой активный ток, который заставит якорь генератора увеличить скорость своего вращения до требуемой величины. Наоборот, если скорость вращения ротора генератора № 2 после подключения его к распределительным шинам окажется больше номинальной, то генератор № 2 пошлет в сеть активный ток, который снизит скорость вращения ротора до требуемой величины. Таким образом, генератор № 2, включившись на параллельную работу в сеть,

автоматически выравнивает скорость вращения своего ротора и достигнет синхронизма с генератором № 1.

Генератор № 2, подключенный к распределительным шинам, еще не будет давать ток потребителям, так как в момент подключения его к сети его электродвижущая сила численно равна напряжению на распределительных шинах. Следовательно, вначале генератор № 2 будет работать в режиме холостого хода.

Чтобы этот генератор нагрузить током, необходимо сообщить ему добавочное количество энергии от первичного двигателя, вращающего его ротор. Первичный двигатель после подачи на него большого количества топлива или пара и т. п. увеличивает свой вращающий момент и, следовательно, число оборотов ротора генератора № 2. В результате электродвижущая сила генератора № 2 начинает опережать на некоторый угол по фазе напряжение на распределительных шинах. А это в свою очередь приводит к тому, что между генераторами № 1 и № 2 устанавливается уравнивающий активный ток, посылаемый генератором № 2 в генератор № 1. Этот уравнивающий ток совпадает по фазе с электродвижущей силой генератора № 2 и находится в противофазе с электродвижущей силой генератора № 1. В силу этого ток (нагрузка) генератора № 1 начинает уменьшаться, а ток генератора № 2 — увеличиваться, т. е. генератор № 1 разгружается, а генератор № 2 нагружается. Дальнейшее увеличение вращающего момента первичного двигателя генератора № 2 приводит к дальнейшей разгрузке генератора № 1 и увеличению нагрузки генератора № 2.

Следовательно, для того чтобы необходимым образом распределить нагрузку между параллельно включенными синхронными генераторами, следует соответствующим образом распределить подачу им энергии от их первичных двигателей.

Если бы возникла необходимость отключить от сети генератор № 1, оставив работающим только генератор № 2, то надо было бы постепенно перевести всю нагрузку с генератора № 1 на генератор № 2 путем увеличения подачи последнему энергии от его первичного двигателя, а затем уже отключить генератор № 1 от сети рубильником K_1 .

Необходимо отметить, что при параллельной работе синхронных генераторов невозможно перевести нагрузку с одного генератора на другой путем изменения тока возбуждения. Дело в том, что при изменении тока возбуждения в одном из генераторов энергия, получаемая им от первичного двигателя, не возрастает. Следовательно, скорость вращения ротора генератора не изменяется и не создается уравнивающего активного тока между параллельно работающими генераторами. Между ними появляется только реактивный уравнивающий ток, средняя мощность которого за период равна нулю.

Рассмотренная нами схема синхроскопа, при которой момент включения генератора в сеть совпадает с потуханием ламп и нулевым показанием нулевого вольтметра, называется схемой на потухание.

При включении на параллельную работу трехфазных синхронных генераторов, помимо требований, перечисленных выше для включения однофазных генераторов, необходимо выполнить

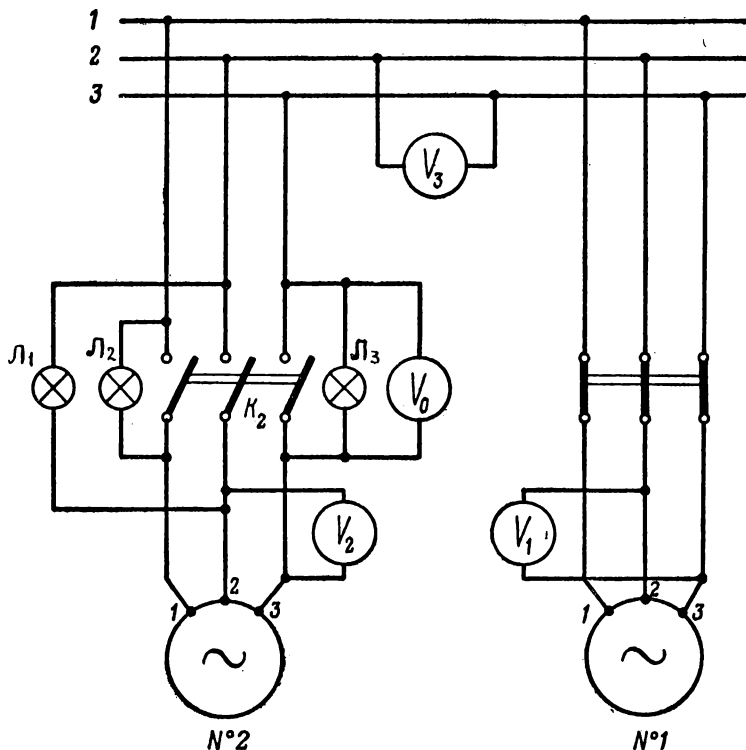


Рис. 500. Схема параллельного включения трехфазных генераторов

еще одно дополнительное требование — получить одинаковое чередование фаз генераторов. Это значит, что одноименные фазы генераторов должны быть подключены к одной и той же распределительной шине. На рис. 500 приведена схема включения трехфазного синхронного генератора № 1 в сеть и схема трехфазного синхронного генератора № 2 с лампами L_1 , L_2 , L_3 и вольтметром V_0 , с помощью которых можно подключить генератор № 2 к распределительным шинам. В момент времени, когда лампы L_1 , L_2 и L_3 синхроскопа начинают одновременно гаснуть на относительно продолжительное время

(3—5 секунд) и нулевой вольтметр показывает нуль, замыкается рубильник K_2 и, следовательно, генератор № 2 подключается к распределительным шинам на параллельную работу с генератором № 1.

После подключения генератора № 2 он будет вначале работать в режиме холостого хода. Для загрузки его током необходимо увеличить вращающий момент его первичного двигателя, этим несколько увеличить число оборотов ротора генератора и дать ему возможность питать током потребители электрической энергии.

Если при подготовке трехфазного генератора к подключению к распределительным шинам окажется, что лампы L_1 , L_2 и L_3 загораются и тухнут поочередно, то это значит, что в данном случае не соблюден порядок чередования фаз генераторов.

ГЛАВА XXXVIII

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 229. СИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Синхронный генератор переменного тока, приспособленный для работы в режиме электродвигателя, называется **синхронным электродвигателем**. Если синхронный генератор питать от сети переменного тока электрической энергией, то он при известных условиях может начать работать как электродвигатель. Рассмотрим, какие же условия необходимо выполнить для этого.

Предположим, что ротор синхронной трехфазной машины находится в состоянии покоя. Подключим к обмотке ротора (обмотке возбуждения) источник электрической энергии постоянного тока и установим нормальный ток возбуждения и нормальный магнитный поток в генераторе. Если теперь подключить статорную обмотку генератора к трехфазной сети, то возникнет вращающееся магнитное поле трехфазного тока статорной обмотки. Число оборотов вращающегося магнитного поля зависит от частоты переменного тока и для двухполюсной машины равно

$$n = 60 f.$$

Если, например, $f = 50$ гц, то вращающееся магнитное поле имеет $n = 60 \cdot 50 = 3000$ об/мин.

Постоянное магнитное поле ротора и вращающееся магнитное поле статора взаимодействуют друг с другом, но ротор не сможет вращаться, так как его полюсы за каждый оборот вращающегося магнитного поля испытывают силу, несколько раз меняющую направление. Эти силы попеременно стремятся вращать ротор в прямо противоположных направлениях. А так как ротор обладает относительно большой инерцией, то под влиянием этих переменных сил он вообще не будет двигаться.

Следовательно, привести во вращение ротор синхронной машины одним лишь включением ее в сеть и заставить тем самым работать как электродвигатель невозможно.

Допустим, что при помощи постороннего двигателя синхронная машина приведена в движение, ее ротору сообщено необхо-

димое число оборотов и она при помощи синхроскопа подключена к сети переменного тока. Если электродвижущая сила этого генератора равна напряжению сети и они совпадают друг с другом по частоте, то подключенный генератор не дает тока в сеть и не получает его из сети, т. е. работает на холостом ходу. Если увеличить мощность двигателя, вращающего ротор генератора, то ротор начнет вращаться с несколько повышенной скоростью и генератор будет посылать ток в сеть, работая в генераторном режиме. Чем больше мощность, подводимая от подвижного двигателя к генератору, тем большую нагрузку она берет на себя.

Теперь допустим, что от синхронного генератора, подключенного к распределительным шинам и работающего вхолостую, отсоединяется первичный двигатель, приводящий в движение его ротор. С исчезновением механической силы, приводящей во вращение ротор генератора, число оборотов ротора начнет уменьшаться и в соответствии с этим электродвижущая сила генератора будет отставать по фазе от напряжения на распределительных шинах. Благодаря этому в якорную (статорную) обмотку генератора из сети поступит активный ток, совпадающий по фазе с напряжением на распределительных шинах и находящийся в противофазе с электродвижущей силой синхронного генератора. Сила взаимодействия этого тока с вращающимся магнитным полем заставит ротор генератора увеличить скорость своего вращения. Это увеличение числа оборотов ротора будет продолжаться до тех пор, пока он не начнет вращаться с синхронной скоростью, т. е. со скоростью, равной скорости вращающегося магнитного поля. Однако синхронная машина, потребляя теперь некоторый активный ток из сети, начала уже работать электродвигателем, но, правда, пока еще в режиме холостого хода. Вращающий момент, развиваемый синхронным электродвигателем, в данном случае пока уравновешен моментом сил сопротивления самого вращающегося ротора.

Теперь допустим, что синхронный электродвигатель, работающий в режиме холостого хода, получил некоторую механическую нагрузку, например, его соединили с помощью ременной передачи с валом какого-нибудь механического станка. Так как момент сил сопротивления стал теперь больше вращающего момента электродвигателя, то скорость вращения ротора начнет снижаться. Это приведет к тому, что электродвижущая сила, индуцированная вращающимся магнитным полем в обмотке статора, будет отставать по фазе от напряжения на распределительных шинах. Благодаря этому увеличится активный ток, поступающий из сети в электродвигатель, с ним вместе начнет расти вращающий момент электродвигателя, а следовательно, и скорость вращения ротора. Последняя будет увеличиваться до тех пор, пока ротор вновь не начнет вращаться с синхронной скоростью. Но теперь в отличие от режима холостого хода электродвигатель будет потреблять из сети больший активный ток.

Чем больше механическая нагрузка синхронного электродвигателя, тем при всех прочих одинаковых условиях он больше потребует энергии из сети, тем больше в его статоре активный ток и тем больший он развивает вращающий момент. Скорость же вращения ротора при стационарной работе электродвигателя остается постоянной и равной синхронной скорости. В моменты изменения механической нагрузки электродвигатель несколько выходит из синхронизма, но это продолжается ничтожно малое время, в течение которого электродвигатель автоматически набирает вновь синхронную скорость, правда, уже при несколько ином электрическом режиме его работы.

Теперь допустим, что механическая нагрузка синхронного электродвигателя в некоторый момент стала чрезмерно большой, превышающей номинальную величину. В этом случае ротор электродвигателя резко снизит скорость своего вращения, так что она станет значительно отличаться от скорости вращающегося магнитного поля. Ротор выпадет из синхронизма и остановится. Объясняется это тем, что после некоторого предельного минимального числа оборотов в минуту ротора сила взаимодействия вращающегося магнитного поля и магнитного поля ротора начинает периодически менять свое направление, так что средняя механическая сила, действующая на ротор, становится равной нулю.

Чтобы снова запустить электродвигатель, необходимо снять с него механическую нагрузку, сообщить его ротору с помощью первичного двигателя синхронную скорость вращения, затем подключить его к сети и после этого механически нагрузить.

Теперь посмотрим, как влияет на режим работы синхронного электродвигателя изменение его тока возбуждения.

Если механическая нагрузка электродвигателя постоянна, то он развивает на своем валу постоянную мощность ($P = \text{const}$) независимо от величины тока возбуждения в цепи. Не зависит от тока возбуждения и скорость вращения ротора: она обусловлена только частотой напряжения сети, к которой подключен электродвигатель.

Если изменяется ток возбуждения электродвигателя, то должно изменяться магнитное поле обмотки возбуждения (роторной обмотки), а вместе с ним — индуктированная электродвижущая сила и ток I в статорной обмотке. Посмотрим, как в этом случае изменяется ток в статорной обмотке при условии постоянства мощности, развиваемой электродвигателем на своем валу ($P = \text{const}$), и постоянства действующего значения напряжения, приложенного к электродвигателю ($U = \text{const}$).

Если мощность синхронного электродвигателя постоянна ($P = \text{const}$) и действующее значение напряжения, приложенного к электродвигателю, также постоянно ($U = \text{const}$), то

$$P = \sqrt{3} UI \cdot \cos \varphi = \text{const},$$

или, иначе,

$$I \cdot \cos \varphi = c = \text{const}, \quad (591)$$

где c — некоторая постоянная величина.

Из последнего соотношения следует, что произведение тока в статорной обмотке синхронного электродвигателя на коэффициент мощности его $\cos \varphi$ при $P = \text{const}$ и $U = \text{const}$ — величина постоянная.

Следовательно, если в результате изменения тока возбуждения синхронного электродвигателя ток в статорной обмотке увеличится в m раз, то в такое же число раз уменьшится коэффициент мощности $\cos \varphi$ электродвигателя. И наоборот, если ток I уменьшится в m раз, то в такое же число раз увеличится коэффициент мощности $\cos \varphi$. Мощность же, развиваемая электродвигателем, останется при этом неизменной, если сохранятся неизменными механическая нагрузка электродвигателя и напряжение на его зажимах.

Дело в том, что изменение тока возбуждения в синхронном электродвигателе приводит к изменению реактивной составляющей тока статорной обмотки и, следовательно, к изменению угла сдвига фаз тока и напряжения. Это значит, что, изменяя ток возбуждения электродвигателя, можно регулировать $\cos \varphi$ в цепи.

Нормальным током возбуждения синхронного электродвигателя называется такой ток, при котором коэффициент мощности $\cos \varphi = 1$ и действующее значение тока в обмотке статора имеют минимальные значения.

Если ток возбуждения меньше нормального, то режим в цепи статора носит индуктивный характер, т. е. ток там отстает по фазе от напряжения на некоторый угол φ . Наоборот, если ток возбуждения больше нормального, то режим в цепи статорной обмотки носит емкостный характер, т. е. ток опережает по фазе напряжение на некоторый угол φ .

На рис. 501 приведен график зависимости величины тока I в статорной обмотке синхронного электродвигателя от тока возбуждения i_b . Левая ветвь этого графика относится к случаю недо-возбуждения электродвигателя (индуктивный режим в цепи статора), а правая — к случаю перевозбуждения (емкостный режим). Минимум тока I относится к случаю нормального тока возбуждения, при котором ток

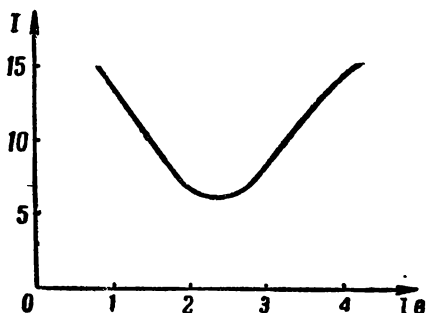


Рис. 501. График зависимости тока в статоре синхронного электродвигателя от тока возбуждения

статорной обмотки совпадает по фазе с приложенным напряжением и соответственно этому $\cos \varphi = 1$. Этот режим наиболее благоприятен с точки зрения загрузки сети током.

Свойство перевозбужденного синхронного электродвигателя работать в емкостном режиме используется для повышения коэффициента мощности $\cos \varphi$ в электрических сетях. Электрическим станциям, питающим электрической энергией большое количество асинхронных электродвигателей, приходится обмениваться с ними большим количеством реактивной энергии, что значительно снижает коэффициент полезного действия станции и загружает генератор реактивным током. Включение в такие сети перевозбужденных синхронных электродвигателей, работающих в емкостном режиме, значительно разгружает станцию от реактивного тока, так как потребители с индуктивным характером нагрузки будут обмениваться реактивной энергией с перевозбужденными электродвигателями.

Пример 221. Генератор трехфазного тока, имеющий линейное напряжение $U_{\text{л}} = 220$ в, питает током $I = 200$ а потребители с индуктивным характером нагрузки и с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,655$. Требуется определить, какую реактивную мощность и реактивный ток должен дать в сеть перевозбужденный синхронный электродвигатель, чтобы генератор был полностью разгружен от реактивной мощности и реактивного тока.

Решение. Активная мощность, развиваемая генератором, равна

$$P = \sqrt{3} UI \cdot \cos \varphi = 1,73 \cdot 220 \cdot 200 \cdot 0,655 \approx 50000 \text{ вт} = 50 \text{ квт.}$$

Активная составляющая тока генератора

$$I_a = I \cdot \cos \varphi = 200 \cdot 0,655 = 131 \text{ а.}$$

Реактивная составляющая тока генератора

$$I_r = \sqrt{I^2 - I_a^2} = \sqrt{200^2 - 131^2} \approx 150 \text{ а.}$$

Перевозбужденный синхронный электродвигатель должен дать реактивную составляющую тока

$$I_r = 150 \text{ а}$$

и реактивную мощность

$$P_r = \sqrt{3} UI_r = 1,73 \cdot 220 \cdot 150 \approx 57100 \text{ ва} = 57,1 \text{ квар.}$$

Пуск в ход маломощного синхронного электродвигателя можно осуществить и без помощи постороннего первичного двигателя. Для этой цели у синхронного электродвигателя размыкают обмотку возбуждения и подключают статорную обмотку к трехфазной сети. Вращающееся магнитное поле тока статорной обмотки при своем движении индуцирует вихревые токи в сердечнике ротора и, взаимодействуя с ними, заставляет ротор вращаться вместе с собой. Когда ротор достигнет практически синхронной скорости вращения, замыкают обмотку возбуждения, и электродвигатель автоматически начинает работать синхронным электродвигателем.

Основное достоинство синхронного электродвигателя — постоянство скорости вращения его ротора и независимость ее от механической нагрузки электродвигателя.

Однако наряду с этим синхронный электродвигатель обладает рядом существенных недостатков. Например, он требует для своего пуска в ход первичного двигателя, выпадает из синхронизма при перегрузке и останавливается, нуждается в постороннем источнике постоянного тока, питающем постоянным током его обмотку возбуждения, и сложен по конструкции.

§ 230. АСИНХРОННЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

Большое применение в современной электротехнике получил асинхронный электродвигатель трехфазного тока.

Чсть изобретения асинхронного электродвигателя принадлежит талантливому русскому инженеру-электрику М. О. Доливо-Добровольскому.

Асинхронный электродвигатель основан на принципе взаимодействия вращающегося магнитного поля трехфазного тока с токами, индуцированными этим полем, в системе подвижных проводников.

Неподвижная часть асинхронного электродвигателя (рис. 502), называемая **статором**, состоит из ярма, на внутренней поверхности которого размещена трехфазная обмотка из ряда симметрично расположенных катушек. Все три обмотки выполнены одинаково и имеют одинаковые параметры r и L . Благодаря этому асинхронный электродвигатель в нормальных условиях работы представляет собой равномерно нагруженную трехфазную систему. Токи в его обмотках (катушках) сдвинуты по фазе относительно друг друга на 120° , и амплитуды этих токов одинаковы:

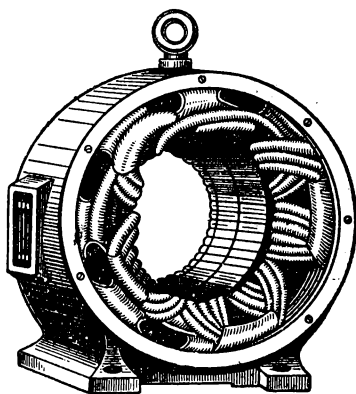


Рис. 502. Статор асинхронного электродвигателя

$$i_1 = I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi),$$

$$i_2 = I_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi\right),$$

$$i_3 = I_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi - \varphi\right).$$

Каждый из этих токов создает свой собственный магнитный поток:

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \Phi_m \cdot \sin(\omega t - \varphi), \\ \Phi_2 &= \Phi_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \varphi\right), \\ \Phi_3 &= \Phi_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi - \varphi\right).\end{aligned}$$

Эти три магнитных потока создают результирующий магнитный поток

$$\Phi = 1,5 \cdot \Phi_m, \quad (592)$$

вращающийся с постоянной угловой скоростью ω . Таким образом, статорная обмотка асинхронного электродвигателя создает вращающееся магнитное поле.

Число оборотов вращающегося магнитного поля зависит от числа пар его полюсов. Если в статоре только три катушки, то вращающееся магнитное поле имеет только одну пару полюсов. В этом случае за один период T магнитный поток делает один оборот. Следовательно, при двухполюсной системе вращающееся магнитное поле за одну минуту сделает число оборотов

$$n_1 = 60 f_1,$$

где f_1 — частота переменного тока.

Если статорную обмотку выполнить из шести катушек, полюсы которых сдвинуты пространственно на 60° относительно друг друга, и соединить последовательно первую катушку с четвертой, вторую с пятой и третью с шестой, то при питании их трехфазным током получим внутри статора четырехполюсное вращающееся магнитное поле. Оно будет совершать вдвое меньше оборотов, чем двухполюсное магнитное поле. На рис. 503 схематически изображены статор и ротор четырехполюсного асинхронного электродвигателя.

Увеличение числа катушек статорной обмотки электродвигателя, т. е. числа его полюсов, влечет за собой изменение числа оборотов его вращающегося магнитного поля. Если в этом поле p пар полюсов, то число оборотов вращающегося магнитного поля

$$n = \frac{60 f_1}{p}. \quad (593)$$

Пример 222. Определить число оборотов вращающегося магнитного поля в статоре асинхронного трехфазного двигателя, если это поле имеет три пары полюсов ($p = 3$), а частота переменного тока $f = 50$ гц.

Решение. По формуле (593) находим

$$n = \frac{60 f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин.}$$

Внутри статора асинхронного электродвигателя помещена подвижная часть его, называемая **ротором**. Ротор асинхронного электродвигателя представляет собой цилиндр, собранный из отдельных железных листов, изолированных друг от друга для устранения потерь на вихревые токи. На железном цилиндре

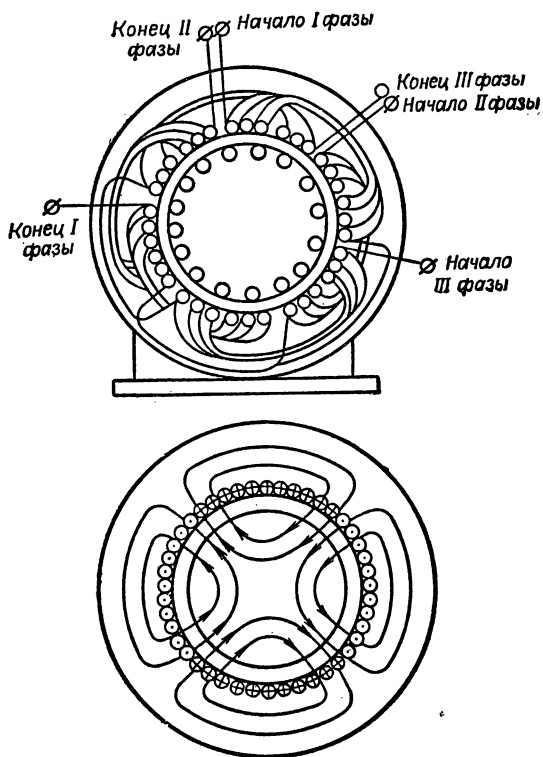


Рис. 503. Схемы статора и ротора четырехполюсного асинхронного электродвигателя

ротора размещена его обмотка. В маломощных двигателях это — ряд толстых неизолированных медных или алюминиевых прутьев, скрепленных по концам общими кольцами («беличье колесо», рис. 504), или изолированные проводники, замкнутые накоротко. Электродвигатели с такими короткозамкнутыми роторами обычно обладают малыми мощностями, примерно 1,5—2 л. с.

В более мощных электродвигателях, где в роторе могут возникнуть большие пусковые токи, опасные для установки, последовательно с обмоткой ротора включают реостат (рис. 505). У таких электродвигателей есть приспособление, дающее возможность обмотку ротора включать последовательно с реостатом

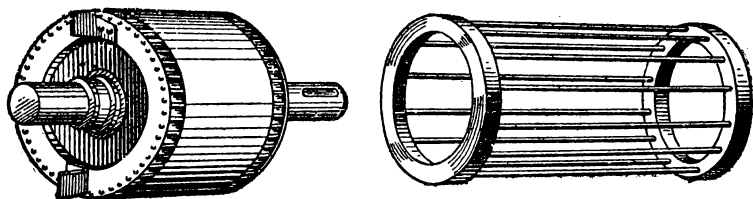


Рис. 504. Ротор „беличье колесо“

и замыкать ее накоротко. Устройство этого приспособления заключается в следующем (рис. 506).

Концы трех фаз обмотки ротора соединены накоротко на задней стороне ротора, а начала их поодиночке присоединены к трем медным кольцам 1, сидящим на валу 2 с передней стороны ротора. Реостат ротора состоит из трех сопротивлений,

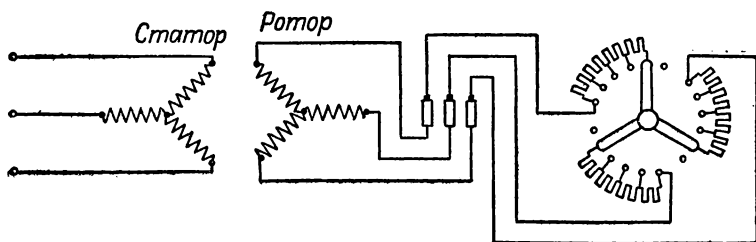


Рис. 505. Схема асинхронного электродвигателя с пусковым реостатом в цепи ротора

концы которых соединены в общую точку, а к началам их присоединены провода, подключенные к щеткам. Щетки при помощи соответствующих приспособлений прижимаются к кольцам ротора и этим создают соединенную «звездой» замкнутую трехфазную цепь, состоящую из последовательно соединенного ротора с реостатом. Замыкание обмотки ротора накоротко осуществ-

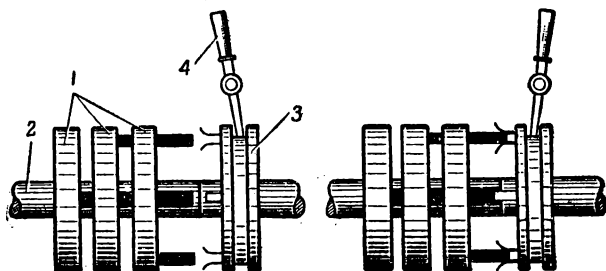


Рис. 506. Приспособление для замыкания обмотки ротора накоротко:

1 — медные кольца; 2 — вал; 3 — пружина; 4 — рычаг

вляется особой втулкой 3, перемещение которой совершается при повороте рычага 4. Одновременно с поворотом рычага и замыканием обмотки ротора накоротко поднимаются щетки и разрывают контакт проводов реостата с кольцами.

Если катушки статора подключить к трехфазной сети, то в системе статора возникнет вращающееся магнитное поле, которое будет пересекать проводники ротора и индуцировать в них электродвижущую силу. Если проводники ротора замкнуты, то в них возникнет индуцированный ток. В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля и индуцированного тока ротор электродвигателя придет в движение, вращаясь в ту же сторону, что и вращающееся магнитное поле, т. е. это поле при своем движении будет увлекать за собой ротор электродвигателя (рис. 507). Чем быстрее будет вращаться ротор, тем меньшее число раз в единицу времени его будет пересекать магнитное поле, тем меньше будет индуцированный ток в его проводниках. В пределе, если бы ротор достиг равенства скорости с вращающимся магнитным полем, т. е. начал бы вращаться с ним синхронно, то в проводниках ротора не мог бы индуцироваться ток, так как они не пересекались бы магнитным полем. Но если индуцированный ток в обмотке ротора исчезнет, то вращающий момент двигателя станет равным нулю и число оборотов ротора будет спадать.

Следовательно, ротор асинхронного двигателя никогда не может вращаться синхронно с магнитным полем, не исключая холостого хода, так как и в этом случае момент сопротивления сил не равен нулю (необходимо затрачивать энергию на вращение самого ротора и на потери холостого хода). В силу этого рассматриваемый нами электродвигатель и назван **асинхронным**, или **несинхронным**.

Если трехфазный асинхронный электродвигатель имеет три статорные катушки, то его вращающееся магнитное поле является двухполюсным; число оборотов этого поля в минуту равно

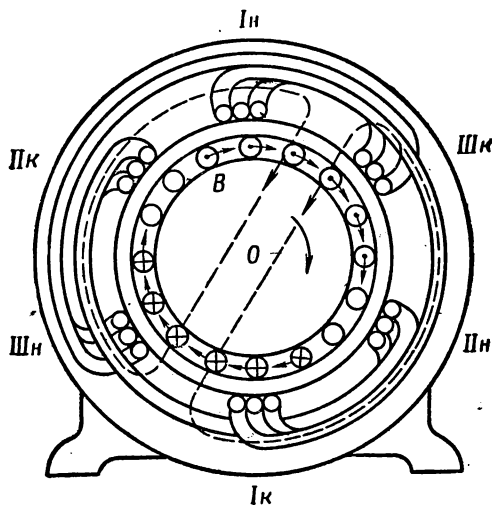


Рис. 507. Вращающееся магнитное поле увлекает за собой ротор электродвигателя

$$n_1 = 60 f_1 \quad (594)$$

где n_1 — число оборотов в минуту вращающегося магнитного поля тока статора;

f_1 — частота тока статора.

Вращающееся магнитное поле тока статора индуцирует в обмотке ротора ток. В результате взаимодействия этого тока с вращающимся магнитным полем тока статора ротор вращается в ту же сторону, что и поле статора, но с несколько меньшей скоростью ($n_2 < n_1$).

Частота f_2 тока, индуцированного в обмотке ротора вращающимся магнитным полем тока статора, зависит от разности чисел оборотов в секунду вращающегося магнитного поля тока статора и вращающегося ротора:

$$f_2 = \frac{n_1 - n_2}{60}. \quad (595)$$

Из формулы (595) следует, что при $n_2 = 0$, т. е. при неподвижном роторе, в обмотке последнего индуцируется ток, частота которого равна частоте тока статора:

$$f_2 = \frac{n_1 - n_2}{60} = \frac{n_1}{60} = f_1.$$

Если же $n_2 \approx n_1$, т. е. ротор вращается почти синхронно с магнитным полем, то частота тока в роторе практически равна нулю:

$$f_2 \approx \frac{n_1 - n_2}{60} = 0.$$

Следовательно, частота тока ротора f_2 может изменяться практически от нуля до f_1 :

$$0 \leq f_2 \leq f_1.$$

Ток ротора создает свое магнитное поле, которое вращается в ту же сторону, что и сам ротор, а следовательно, в ту же сторону, что и вращающееся магнитное поле тока статора.

Скорость вращения магнитного поля тока ротора относительно самого ротора зависит от частоты тока ротора:

$$n_p = 60 f_2, \quad (596)$$

где n_p — число оборотов в минуту магнитного поля тока ротора;

f_2 — частота тока ротора.

Скорость вращения магнитного поля ротора относительно статора будет несколько больше, чем относительно самого ротора:

$$n_c = n_p + n_2, \quad (597)$$

где n_c — число оборотов в минуту магнитного поля ротора относительно статора;

n_2 — число оборотов ротора в минуту;

n_p — число оборотов в минуту магнитного поля ротора относительно ротора.

Но согласно предыдущему

$$n_2 = 60 (f_1 - f_2) \text{ и } n_p = 60 f_2,$$

а поэтому вместо формулы (597) можем написать

$$n_c = 60 (f_1 - f_2) + 60 f_2 = 60 f_1,$$

или, иначе,

$$n_c = n_1, \quad (598)$$

т. е. магнитное поле тока ротора вращается относительно статора с той же скоростью, что и магнитное поле тока статора.

Следовательно, вращающиеся магнитные поля токов статора и ротора неподвижны в пространстве относительно друг друга.

Если механическая нагрузка электродвигателя возрастет, то должно уменьшиться число оборотов ротора в минуту n_2 . Это повлечет за собой увеличение частоты f_2 тока в роторе и соответственно с этим числа оборотов в минуту n_p магнитного поля ротора относительно самого ротора. При этом насколько убывает величина n_2 , настолько возрастает величина n_p , так что их сумма все время сохраняется постоянной по величине:

$$n_c = n_2 + n_p = \text{const.}$$

Это значит, что при всяких изменениях механической нагрузки асинхронного электродвигателя скорость вращения магнитного поля тока ротора относительно статора сохраняется неизменной и равной скорости вращения магнитного поля тока статора.

Отношение разности скоростей вращения магнитных полей токов статора и ротора электродвигателя к скорости вращения магнитного поля тока статора называется скольжением:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%, \quad (599)$$

где S — скольжение в процентах;

n_1 — число оборотов в минуту вращающегося магнитного поля тока статора;

n_2 — число оборотов в минуту ротора.

Скольжение S , как величина, характеризующая запаздывание скорости вращения ротора относительно скорости вращения

магнитного поля статора, играет важную роль при рассмотрении режима работы асинхронного электродвигателя.

Из формулы (599) следует, что при $n_2 = 0$, т. е. при неподвижном роторе, скольжение S равно

$$S = \frac{n_1 - 0}{n_1} \cdot 100\% = 100\%.$$

Следовательно, в начальный момент пуска в ход асинхронного электродвигателя скольжение максимально и равно 100%.

При $n_2 \rightarrow n_1$, т. е. в том случае, когда ротор стремится достигнуть синхронной скорости,

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% \rightarrow 0,$$

т. е. скольжение стремится к нулю.

Согласно формуле (595)

$$f_2 = \frac{n_1 - n_2}{60},$$

или, иначе,

$$f_2 = \frac{n_1 - n_2}{60} \cdot \frac{60 f_1}{n_1},$$

так как $n_1 = 60 f_1$.

Отсюда, принимая во внимание, что $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$, получим

$$f_2 = S f_1, \quad (600)$$

т. е. частота тока f_2 в роторе асинхронного электродвигателя равна произведению частоты f_1 тока статора на скольжение S .

Пример 223. Скорость вращения двухполюсного магнитного поля асинхронного электродвигателя равна $n = 3000$ об/мин. Определить частоту тока статора, частоту тока ротора и скорость вращения ротора, если скольжение $S = 3\%$.

Решение. Частота тока статора

$$f_1 = \frac{n}{60} = \frac{3000}{60} = 50 \text{ гц.}$$

Частота тока ротора

$$f_2 = S f_1 = 0,03 \cdot 50 = 1,5 \text{ гц.}$$

Скорость вращения ротора

$$n_2 = 60 (f_1 - f_2) = 60 \cdot (50 - 1,5) = 2910 \text{ об/мин.}$$

Вращающий момент. На рис. 508 приведен график зависимости вращающего момента асинхронного электродвигателя от скольжения. При малых величинах скольжения вращающий момент M электродвигателя увеличивается с ростом скольжения S ,

при средних значениях скольжения он достигает некоторого максимума, а с дальнейшим ростом скольжения убывает.

При пуске в ход асинхронного электродвигателя вращающий момент его относительно невелик, но все же он больше, чем момент сил сопротивления движению ($M > M_{сопр}$). Это приводит к тому, что ротор электродвигателя начинает вращаться, постепенно увеличивая скорость своего движения, а скольжение, наоборот, уменьшается.

Затем по мере уменьшения скольжения и, следовательно, увеличения числа оборотов ротора в минуту вращающий момент электродвигателя пройдет через максимум и начнет спадать по своей величине. Наконец, когда установится такое скольжение, при котором вращающий момент станет равным моменту сил сопротивления движению, ротор электродвигателя будет вращаться с постоянным числом оборотов в минуту.

Если механическая нагрузка электродвигателя увеличится и соответственно возрастет момент сил сопротивления движению ($M_{сопр} > M$), то число оборотов ротора начнет уменьшаться, а скольжение и вращающий момент электродвигателя — увеличиваться. В конечном итоге в электродвигателе вновь установится динамическое равновесие ($M = M_{сопр}$), но уже при меньшем числе оборотов ротора в минуту и соответственно при возросшем скольжении.

Максимальное значение вращающего момента асинхронного электродвигателя не зависит от активного сопротивления роторной цепи.

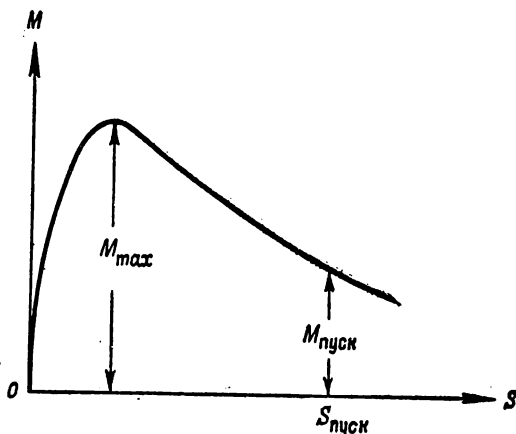


Рис. 508. Зависимость вращающего момента асинхронного электродвигателя от скольжения

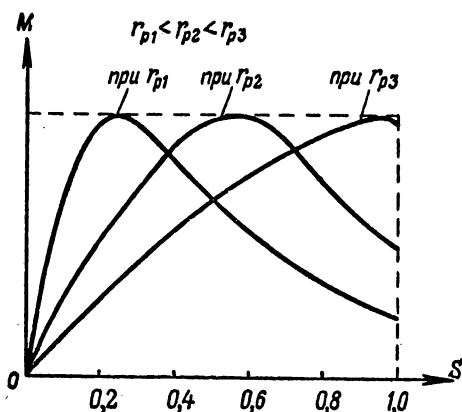


Рис. 509. Графики зависимости вращающего момента асинхронного электродвигателя от скольжения при различных активных сопротивлениях роторной цепи

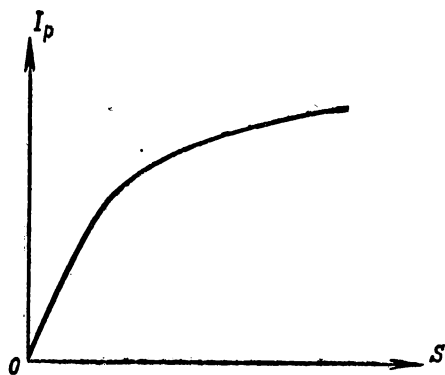


Рис. 510. Зависимость тока в роторе от скольжения

скольжения при различных активных сопротивлениях роторной цепи. Чем правее расположен максимум вращающего момента на графике, т. е. чем ближе он к максимуму скольжения, тем больший вращающий момент развивает электродвигатель при пуске в ход.

На рис. 510 показана зависимость роторного тока I_p от скольжения. Здесь мы видим, что с ростом скольжения ток в роторе электродвигателя растет. При пуске в ход электродвигателя, когда скольжение равно максимуму, роторный ток также максимален. Наоборот, при холостом ходе электродвигателя, когда скольжение электродвигателя мало, роторный ток также мал.

С ростом тока в роторе увеличивается и ток в статоре из-за размагничивающего действия ампер-витков ротора. Ток статора имеет две составляющие: активную и реактивную. Активная составляющая обеспечивает механическую работу электродвигателя, а реактивная составляющая создает вращающее магнитное поле и одновременно с этим ампер-витки, компенсирующие размагничивающее действие ампер-витков роторного тока (реакция якоря).

Так как реактивная составляющая тока статора относительно велика, то угол сдвига фаз тока и напряжения в статорной обмотке больше, чем в роторной. Соответственно

Однако при изменении сопротивления ротора изменяется величина скольжения, при которой создается максимальный вращающий момент. Следовательно, путем изменения активного сопротивления можно добиться того, чтобы максимум вращающего момента электродвигателя получался при любом заданном скольжении. На рис. 509 приведены графики зависимости вращающего момента асинхронного электродвигателя от

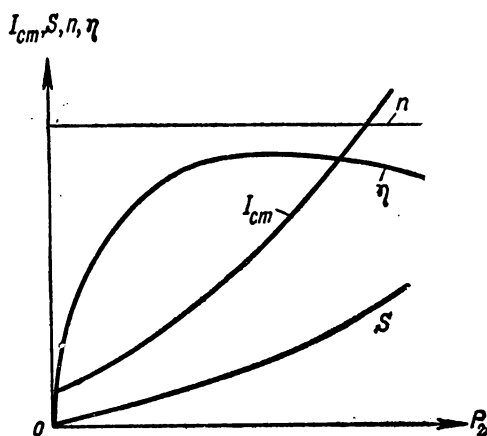


Рис. 511. Рабочие характеристики асинхронного электродвигателя

этому коэффициент мощности в цепи статора меньше, чем в цепи ротора:

$$\cos \varphi_{ст} < \cos \varphi_{р}$$

На рис. 511 изображены рабочие характеристики асинхронного электродвигателя, выражающие зависимость основных величин, характеризующих его работу, от полезной механической мощности P_2 , развиваемой им на валу.

1. Скольжение S электродвигателя увеличивается с ростом его полезной мощности. Оно имеет наименьшую величину при холостом ходе (примерно до 3%), а затем с ростом полезной мощности увеличивается, достигая при номинальной полезной мощности в среднем 5%.

2. Скорость вращения ротора электродвигателя n с ростом полезной мощности уменьшается; при номинальной полезной мощности она на 3—5% меньше скорости вращения магнитного поля.

3. Ток в статорной обмотке $I_{ст}$ растет с увеличением полезной мощности электродвигателя. При холостом ходе он имеет минимальное значение, а затем по мере увеличения полезной мощности растет.

4. Коэффициент полезного действия η электродвигателя равен отношению полезной мощности к электрической, потребляемой им из сети. При холостом ходе к. п. д. равен нулю, а затем с увеличением полезной мощности он растет. При номинальной полезной мощности к. п. д. достигает максимума, а затем начинает медленно спадать. Мощные асинхронные электродвигатели имеют к. п. д. в среднем около 90%.

Пуск в ход асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором производится простым включением рубильника. В начальный момент, когда скольжение равно единице, в обмотках ротора и статора возникают очень большие токи (в полтора — два раза больше нормальных). Но так как пусковой период длится несколько секунд, то пусковые токи не опасны для электродвигателя.

Чтобы избежать появления чрезмерно больших пусковых токов, в мощных электродвигателях в цепь ротора на время пуска в ход включают реостат или же обмотки статора переключают со «звезды» на «треугольник». В первом случае перед пуском электродвигателя в ход при помощи рычага опускают щетки на кольца ротора и затем замыкают рубильник в цепи статора. Когда ротор начинает увеличивать скорость вращения, выводят сопротивление реостата ротора и, когда ротор разовьет нормальную скорость, поднимают щетки, замыкая обмотку ротора накоротко. На рис. 505 показана схема асинхронного электродвигателя с пусковым реостатом.

При пуске в ход электродвигателя переключением его статорной обмотки с «треугольника» на «звезду» напряжение на каждой фазе статорной обмотки понижается в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с линейным напряжением. Следовательно, пусковой ток в статорной обмотке и соответственно с этим и в роторной обмотке уменьшается. После того как ротор электродвигателя разовьет нормальную скорость вращения, противоэлектродвижущая сила достигнет определенной величины и ток уменьшится, статорную обмотку переключают на «треугольник». Тогда каждая

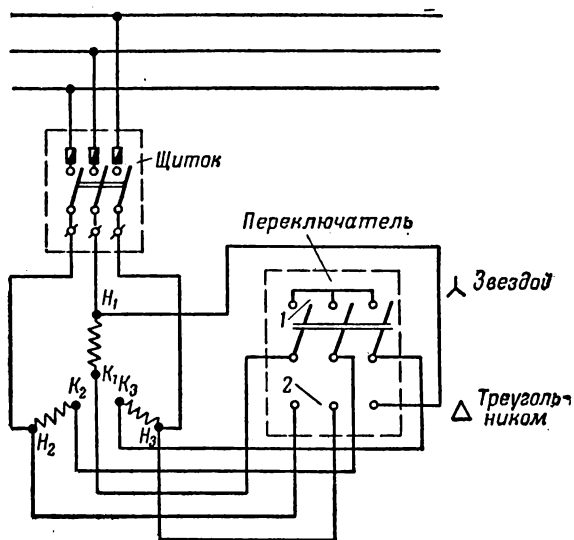


Рис. 512. Схема приспособления для пуска асинхронного электродвигателя путем переключения со «звезды» на «треугольник»

фаза статорной обмотки будет находиться под линейным напряжением и в соответствии с этим электродвигатель будет работать в нормальном режиме.

На рис. 512 показана схема приспособления для пуска асинхронного электродвигателя путем переключения со «звезды» на «треугольник».

Число оборотов ротора асинхронного электродвигателя можно регулировать путем включения реостата в цепь ротора, например пускового реостата, который может выдерживать продолжительное время нормальный ток нагрузки двигателя. Увеличивая сопротивление реостата, достигают увеличения скольжения или, иначе говоря, уменьшения числа оборотов ротора электродвигателя. Этот способ регулировки нельзя назвать рациональным, так как он сильно влияет на к. п. д. двигателя.

Иногда вместо реостата для регулировки числа оборотов ротора пользуются трёхфазным трансформатором, включенным в статорную цепь. Изменяя напряжение, подаваемое на статор при помощи трансформатора, можно в известной степени изменять число оборотов ротора электродвигателя.

Вращающий момент электродвигателя зависит от квадрата приложенного напряжения. Понижение сетевого напряжения до 30% может привести к полной остановке электродвигателя из-за малой величины вращающего момента.

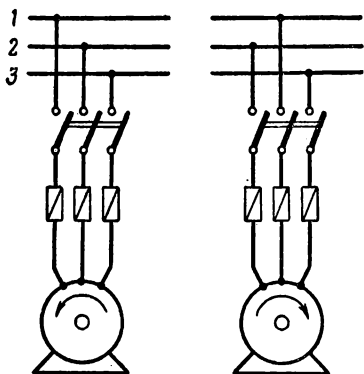


Рис. 513. Электродвигатель изменяет направление своего вращения при переключении двух линейных проводов у зажимов ротора

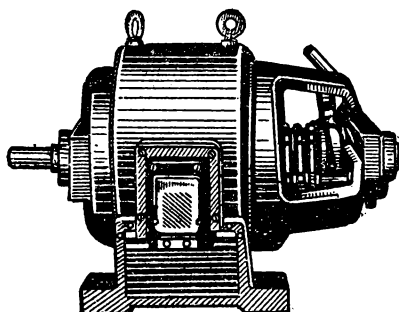


Рис. 514. Внешний вид асинхронного электродвигателя

Для изменения направления вращения асинхронного электродвигателя достаточно поменять местами концы двух проводов, идущих от сети и подключенных к статорной обмотке электродвигателя. В этом случае изменяет направление своего вращения вращающееся магнитное поле, а с ним вместе и ротор электродвигателя (рис. 513).

Коэффициент мощности ($\cos \varphi$) асинхронного электродвигателя сильно зависит от его нагрузки. При нормальной нагрузке он достигает максимального значения, а при малой нагрузке его величина падает до 0,1. Там, где работает много асинхронных электродвигателей, проблема $\cos \varphi$ для питающих электрических станций приобретает немаловажное значение.

Асинхронные электродвигатели просты по своему устройству, относительно дешевы, не требуют за собой особого ухода, удобны в эксплуатации, имеют малую зависимость числа оборотов от нагрузки и т. п. Поэтому они широко применяются на практике и являются одним из лучших типов электродвигателей переменного тока. На рис. 514 показан внешний вид асинхронного электродвигателя.

ПРИЛОЖЕНИЕ

I

АБСОЛЮТНАЯ ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ РАЦИОНАЛИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ МКСА

Наименования и определения единиц системы МКСА

Наименование	Сокращенное обозначение		Определение
	русским шрифтом	латинским (греческим) шрифтом	
Единица электрического тока ампер	<i>a</i>	A	Неизменяющийся электрический ток, который, протекая по каждому из двух бесконечно длинных параллельных прямолинейных проводников ничтожно малого кругового сечения, расположенных на расстоянии 2 м друг от друга в безвоздушном пространстве, создает между этими проводниками на каждый метр их длины силу взаимодействия, которая массе в одну десятиmillionную (0,0000001) килограмма сообщает ускорение в 1 метр на секунду в квадрате
Единица количества электричества кулон или ампер-секунда	<i>к</i> <i>a-сек</i>	C A-S	Количество электричества, протекающего через поперечное сечение проводника в течение 1 секунды при неизменяющемся токе в 1 ампер
Единица разности электрических потенциалов, электрического напряжения и электродвижущей силы вольт	<i>в</i>	V	Разность электрических потенциалов между двумя точками линейного проводника, по которому протекает неизменяющийся электрический ток в 1 ампер, когда мощность, потребляемая между этими точками, равна 1 ватту

Наименование	Сокращенное обозначение		Определение
	Русским шрифтом	Латинским (греческим) шрифтом	
Единица электрического сопротивления ом	ом	Ω	Электрическое сопротивление между двумя точками линейного проводника, в котором неизменяющаяся разность электрических потенциалов между этими точками в 1 вольт вызывает электрический ток в 1 ампер
Единица электрической емкости фарада	ф	F	Электрическая емкость конденсатора, между обкладками которого существует разность электрических потенциалов 1 вольт, когда он заряжен количеством электричества 1 кулон
Единица магнитного потока вольт-секунда	в-сек	V-S	Магнитный поток, при убывании которого до нуля количество электричества, протекающего через поперечное сечение неразветвленной линейной электрической цепи, сцепленной с этим потоком и имеющей сопротивление в 1 ом, равно 1 кулону
Единица магнитной индукции вольт-секунда на квадратный метр	в-с/к/м. ²	V-S/m ²	Магнитная индукция, при которой магнитный поток через поверхность 1 квадратный метр, расположенную в равномерном магнитном поле перпендикулярно к линиям магнитной индукции, равен 1 вольт-секунде
Единица индуктивности и взаимной индуктивности генри	гн	H	Индуктивность электрической цепи, с которой сцепляется магнитный поток самоиндукции в 1 вольт-секунду при неизменяющемся токе в цепи, равном 1 амперу
Единица магнитодвижущей силы ампер или ампер-виток	а а-в	A A-w	Взаимная индуктивность двух электрических цепей, с одной из которых сцепляется магнитный поток взаимной индукции в 1 вольт-секунду при неизменяющемся токе в другой цепи, равном 1 амперу
Единица напряженности магнитного поля (магнитной силы) ампер на метр	а'м	A/m	Магнитодвижущая сила вдоль замкнутого контура, однократно сцепленного с электрической цепью, по которой протекает электрический ток в 1 ампер
			Напряженность магнитного поля в однородной и изотропной среде на расстоянии $\frac{1}{2\pi}$ метра от бесконечно длинного прямолинейного проводника ничтожно малого кругового сечения, по которому протекает электрический ток в 1 ампер

II

Соотношение между единицами абсолютной практической электромагнитной рационализованной системы МКСА и единицами абсолютных нерационализованных систем СГСЭ и СГСМ

Величина	Наименование единицы в системе единиц МКСА	Обозначение единицы		Одна единица системы МКСА содержит в себе единиц нерационализованных систем	
		русскими буквами	латинскими или греческими буквами	СГСЭ	СГСМ

1. Основные величины

Длина	Метр	<i>м</i>	m	10^2 (см)	10^2 (см)
Масса	Килограмм	<i>кг</i>	kg	10^3 (г)	10^3 (г)
Время	Секунда	сек.	sec	1 (сек.)	1 (сек.)
Ток	Ампер	<i>а</i>	A	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}

2. Механические единицы

Скорость	Метр в секунду	<i>м/сек</i>	m/sec	10^2	10^2
Ускорение	Метр в секунду за одну секунду	<i>м/сек²</i>	m/sec ²	10^2	10^2
Сила	Ньютон	<i>н</i>	N	10^5 (дин)	10^5 (дин)
Энергия, работа	Джоуль	<i>дж</i>	J	10^7 (эрг)	10^7 (эрг)
Мощность	Ватт	<i>вт</i>	W	10^7	10^7

3. Электрические единицы

Электрический заряд	Кулон	<i>к</i>	C	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}
Электродвижущая сила, напряжение, разность потенциалов	Вольт	<i>в</i>	V	$\frac{1}{300}$	10^3
Напряженность электрического поля	Вольт на метр	$\frac{в}{м}$	$\frac{V}{m}$	$\frac{1}{300}$	10^3
Электрическая емкость	Фарада	<i>ф</i>	F	$9 \cdot 10^{11}$	10^{-9}

Величина	Наименование единицы в системе единиц МКСА	Обозначение единицы		Одна единица системы МКСА содержит в себе единиц нерационализированных систем	
		русскими буквами	латинскими или греческими буквами	СГСЭ	СГСМ
Плотность тока	Ампер на квадратный метр	$\frac{a}{m^2}$	$\frac{A}{m^2}$	$3 \cdot 10^5$	10^{-5}
Электрическое сопротивление	Ом	ом	Ω	$\frac{1}{9} 10^{-11}$	10^9
Удельное сопротивление	Ом-метр	ом·м	Ωm	$\frac{1}{9} 10^{-9}$	10^{11}
Удельная проводимость	Единица на ом-метр	$\frac{1}{ом \cdot м}$	$\frac{1}{\Omega m}$	$9 \cdot 10^9$	10^{-11}

4. Магнитные единицы

Магнитный поток	Вольт-секунда	в/сек	V sec	$\frac{1}{300}$	10^8 (мкс)
Магнитная индукция	Вольт-секунда на квадратный метр	$\frac{в-сек}{m^2}$	$\frac{V sec}{m^2}$	$\frac{1}{3} 10^{-6}$	10^4 (гс)
Напряженность магнитного поля	Ампер на метр	$\frac{a}{m}$	$\frac{A}{m}$	$4 \cdot 3 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^{-2}$ (э)
Индуктивность (коэффициент самоиндукции)	Генри	гн	H	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$	10^9
Взаиминдуктивность (коэффициент взаимоиנדукции)	Генри	гн	H	$\frac{1}{9} 10^{-11}$	10^9
Магнитодвижущая сила	Ампер-виток	а-в	A-w	$3 \cdot 10^9$	10^{-1} (гб)

Примечание. Большинство единиц систем СГСЭ и СГСМ специального наименования не имеет, за исключением некоторых наиболее употребительных магнитных единиц системы СГСМ:

максвелл (мкс, Mx) — для единицы магнитного потока,
 гаусс (гс, Gs) — для единицы магнитной индукции,
 эрстед (э, Oe) — для единицы напряженности магнитного поля,
 гильберт (гб, Gb) — для единицы магнитодвижущей силы.

III

Международные единицы измерения электрических и магнитных величин

В свое время были воспроизведены вещественные образцы существующих практических единиц измерения электрических и магнитных величин, и они были приняты в качестве эталонов в так называемой международной практической системе единиц.

Между абсолютными единицами МКСА и международными единицами существуют следующие соотношения:

1 международный джоуль	= 1,00020	абсолютного джоуля
1 международный ватт	= 1,00020	абсолютного ватта
1 международный ампер	= 0,99985	абсолютного ампера
1 международный кулон	= 0,99985	абсолютного кулона
1 международный вольт	= 1,00035	абсолютного вольты
1 международный ом	= 1,00050	абсолютного ома
1 международная фарада	= 0,99950	абсолютной фарады
1 международная вольт-секунда	= 1,00035	абсолютной вольт-секунды
1 международный генри	= 1,00050	абсолютного генри

Примечания: 1. Международный ампер — величина неизменяющегося электрического тока, который отлагает на катоде 0,001118 грамма серебра в секунду, проходя через водный раствор азотнокислого серебра.

2. Международный ом — сопротивление, при неизменяющемся электрическом токе и при температуре тающего льда, ртутного столба длиной 106,30 сантиметра, имеющего сечение, одинаковое по всей длине, и массу 14,4521 грамма.

IV

Кратные и дольные единицы

Наименование кратных и дольных единиц образуется путем прибавления соответствующих приставок к наименованиям единиц измерения величин. В нижеследующей таблице приведены наименования этих приставок.

Наименование	Отношение к главной единице	Сокращенное обозначение	
		русским алфавитом	латинским (греческим) алфавитом
Пико	10^{-12}	<i>п</i>	<i>p</i>
Нано	10^{-9}	<i>н</i>	<i>n</i>
Микро	10^{-6}	<i>мк</i>	<i>μ</i>
Милли	10^{-3}	<i>м</i>	<i>m</i>
Санتي	10^{-2}	<i>с</i>	<i>c</i>
Деци	10^{-1}	<i>д</i>	<i>d</i>
Дека	10	<i>дк</i>	<i>dc</i>
Гекто	10^2	<i>г</i>	<i>h</i>
Кило	10^3	<i>к</i>	<i>k</i>
Мега	10^6	<i>М</i>	<i>M</i>
Гига	10^9	<i>Г</i>	<i>G</i>
Тера	10^{12}	<i>Т</i>	<i>T</i>

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Буквенные обозначения некоторых электрических величин	5
Условные графические изображения, применяемые в электрических схемах	6
Введение	9

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Глава I. Электрические свойства вещества	17
§ 1. Материя и ее движение	—
§ 2. Химические элементы	21
§ 3. Атомы	24
§ 4. Элементарные частицы вещества	25
§ 5. Строение атомов	30
§ 6. Энергия атомного ядра	37
§ 7. Молекулы и физические тела	43
§ 8. Электрические проводники первого рода	46
§ 9. Электрические проводники второго рода	49
§ 10. Полупроводники	51
§ 11. Диэлектрики	55
§ 12. Электропроводимость газов	57
Глава II. Электрический заряд и единицы его измерения	58
§ 13. Системы единиц измерения электрических и магнитных величин	—
§ 14. Электрический заряд физического тела	61
§ 15. Единицы измерения электрического заряда	64
Глава III. Электрическое поле электрических зарядов	66
§ 16. Понятие об электрическом поле электрических зарядов	—
§ 17. Электростатическое поле	68
§ 18. Потенциал электростатического поля	69
§ 19. Напряжение в электростатическом поле	73
§ 20. Работа силы электростатического поля	74
§ 21. Напряженность электростатического поля	75
§ 22. Закон Кулона	78
Глава IV. Проводники и диэлектрики в электростатическом поле	82
§ 23. Проводники первого рода в электростатическом поле	—
§ 24. Диэлектрики в электростатическом поле	86

	Стр.
Глава V. Электрическая емкость	90
§ 25. Электрическая емкость проводника и единицы ее измерения	—
§ 26. Плоский конденсатор	92
§ 27. Конденсаторы	94
§ 28. Параллельное соединение конденсаторов	104
§ 29. Последовательное соединение конденсаторов	106
§ 30. Смешанное соединение конденсаторов	109
§ 31. Энергия электростатического поля	111
§ 32. Электрическая прочность диэлектриков	113
Глава VI. Электрический ток	116
§ 33. Направление и величина электрического тока	—
§ 34. Плотность тока	119
§ 35. Постоянный ток и стационарное электрическое поле	120
§ 36. Сторонние электрические поля	122
Глава VII. Электродвижущая сила и напряжение источника электрической энергии	125
§ 37. Электродвижущая сила источника электрической энергии	—
§ 38. Напряжение на участках электрической цепи	127
Глава VIII. Электрическое сопротивление	131
§ 39. Электрическое сопротивление проводников	—
§ 40. Зависимость сопротивления проводников от их размеров и материала	132
§ 41. Проводимость проводников	135
§ 42. Зависимость сопротивления проводников от температуры	137
§ 43. Реостаты и магазины сопротивлений	138
§ 44. Сопротивления постоянной величины	142
§ 45. Сопротивление полупроводников и диэлектриков	144
Глава IX. Простая цепь постоянного тока	145
§ 46. Закон Ома для участка цепи	—
§ 47. Закон Ома для всей цепи	147
§ 48. Цепь постоянного тока с последовательно соединенными потребителями	148
§ 49. Распределение потенциала в электрической цепи	151
Глава X. Работа и мощность электрического тока	155
§ 50. Работа электрического тока	—
§ 51. Мощность электрического тока	157
§ 52. Исследование режима в цепи с источником электрической энергии, имеющим постоянную электродвижущую силу и постоянное внутреннее сопротивление	159
Глава XI. Цепь постоянного тока с параллельно и смешанно соединенными сопротивлениями	167
§ 53. Первый закон Кирхгофа	—
§ 54. Напряжение на зажимах параллельно соединенных сопротивлений	168
§ 55. Распределение токов в параллельно соединенных сопротивлениях	170
§ 56. Эквивалентное сопротивление нескольких параллельно соединенных потребителей	171
§ 57. Потенциометр	174
§ 58. Цепи постоянного тока со смешанно соединенными сопротивлениями и одним источником электрической энергии	—

	Стр.
Глава XII. Сложные цепи постоянного тока	179
§ 59. Второй закон Кирхгофа	—
§ 60. Применение законов Кирхгофа к расчету сложных цепей	181
§ 61. Метод контурных токов	190
Глава XIII. Тепловое действие электрического тока	196
§ 62. Термический эквивалент	—
§ 63. Закон Ленца — Джоуля	197
§ 64. Плавкие предохранители	198
§ 65. Электрические лампы	200
§ 66. Электрическая дуга	201
Глава XIV. Магнитное поле	204
§ 67. Понятие о магнитном поле	—
§ 68. Магнитная индукция	207
§ 69. Магнитная проницаемость	210
§ 70. Магнитный поток	212
§ 71. Напряженность магнитного поля	215
Глава XV. Магнитное поле постоянного тока в однородной среде	217
§ 72. Магнитное поле постоянного тока, протекающего по прямолинейному проводу	—
§ 73. Магнитное поле кольцевого тока	220
§ 74. Магнитное поле однослойной цилиндрической катушки	221
Глава XVI. Магнитная цепь со сталью	224
§ 75. Намагничивание парамагнитных и диамагнитных веществ	—
§ 76. Намагничивание ферромагнитных веществ	228
§ 77. Циклическое перемагничивание	233
§ 78. Магнитные материалы	236
§ 79. Законы для магнитных цепей	241
§ 80. Расчет простой магнитной цепи	248
§ 81. Расчет разветвленной магнитной цепи	253
§ 82. Электромагниты	256
Глава XVII. Механическое действие магнитного поля на проводники с токами	259
§ 83. Механическое действие магнитного поля на прямолинейный проводник с током	—
§ 84. Механическое действие магнитного поля на контур с током	263
§ 85. Механическая сила взаимодействия проводников с токами	265
§ 86. Работа сил магнитного поля	267
Глава XVIII. Электромагнитная индукция	269
§ 87. Индуцированная электродвижущая сила в прямолинейном проводнике, перемещающемся в магнитном поле	—
§ 88. Индуцированная электродвижущая сила в замкнутом контуре и катушке	274
§ 89. Электродвижущая сила самоиндукции	278
§ 90. Индуктивность цилиндрических катушек	284
§ 91. Электродвижущая сила взаимной индукции	288
§ 92. Взаимная индуктивность двух катушек	290
§ 93. Последовательное и параллельное соединение катушек индуктивности	293
§ 94. Энергия магнитного поля	295

ПЕРЕМЕННЫЕ ТОКИ

Глава XIX. Основные положения теории переменного тока . .	298
§ 95. Общее понятие о переменном токе	—
§ 96. Некоторые основные определения переменного тока . .	299
§ 97. Переменный синусоидальный ток	301
§ 98. Простейший способ получения синусоидальной электро- движущей силы	305
§ 99. Векторная диаграмма синусоидального тока	308
§ 100. Действующее значение переменного синусоидального тока	313
Глава XX. Простая цепь переменного тока с индуктивностью и активным сопротивлением	316
§ 101. Активное сопротивление	—
§ 102. Цепь переменного тока с активным сопротивлением . .	317
§ 103. Индуктивность в цепи переменного тока	320
§ 104. Цепь переменного тока с индуктивностью и активным сопротивлением	330
§ 105. Цепь с несколькими последовательно соединенными активными сопротивлениями и индуктивностями	337
Глава XXI. Простая цепь переменного тока с емкостью и актив- ным сопротивлением	340
§ 106. Подключение конденсатора к источнику электрической энергии с постоянным напряжением и разряд конденса- тора через активное сопротивление	—
§ 107. Цепь переменного тока с емкостью	344
§ 108. Цепь переменного тока с емкостью и активным сопро- тивлением	351
Глава XXII. Простая цепь переменного тока с последовательно соединенными индуктивностью, емкостью и активным сопро- тивлением	358
§ 109. Колебательный и аperiodический разряд конденсатора	—
§ 110. Вынужденные колебания в цепи с индуктивностью, емкостью и активным сопротивлением, соединенными последовательно	372
§ 111. Резонанс напряжений	380
Глава XXIII. Цепи переменного тока с параллельно соединен- ными потребителями	394
§ 112. Цепь переменного тока с двумя параллельно соединен- ными катушками индуктивности	—
§ 113. Активный и реактивный ток	398
§ 114. Активная и реактивная проводимости	400
§ 115. Определение сопротивления, угла сдвига фаз, мощности и величины тока в цепи посредством ее проводимостей	403
§ 116. Применение метода проводимостей к расчету цепи с параллельно соединенными катушками индуктивности	404
§ 117. Цепь переменного тока с параллельно соединенными индуктивностью и емкостью	407
§ 118. Резонанс токов	415
Глава XXIV. Применение метода комплексных чисел в теории переменных токов	433
§ 119. Общие замечания	—
§ 120. Мнимое число	434

	Стр.
§ 121. Комплексное число	436
§ 122. Действия над комплексными числами	439
§ 123. Комплексы синусоидального тока и напряжения	444
§ 124. Сопротивления цепей переменного тока в комплексной форме	447
§ 125. Проводимости цепей переменного тока в комплексной форме	450
§ 126. Мощность синусоидального тока в комплексной форме	452
§ 127. Основные законы переменного тока в комплексной форме	454
§ 128. Примеры расчета цепей переменного тока при помощи комплексного метода	456
Глава XXV. Многофазные системы	462
§ 129. Трехфазная система	—
§ 130. Трехфазная система, соединенная „звездой“	466
§ 131. Трехфазная система, соединенная „треугольником“	473
§ 132. Мощность трехфазного тока	477
§ 133. Вращающееся магнитное поле трехфазного тока	478
§ 134. Двухфазное вращающееся магнитное поле	483
Глава XXVI. Катушки и трансформаторы со стальными сердечниками	486
§ 135. Общие положения	—
§ 136. Мощность потерь на перемагничивание стали	487
§ 137. Мощность потерь на вихревые токи	488
§ 138. Катушка со стальным сердечником в цепи переменного тока	490
§ 139. Общее понятие о трансформаторах	499
§ 140. Работа трансформатора при холостом ходе	501
§ 141. Работа трансформатора при нагрузке	504
§ 142. Векторная диаграмма нагруженного трансформатора	507
§ 143. Внешняя характеристика трансформатора	511
§ 144. Коэффициент полезного действия трансформатора	513
§ 145. Типы трансформаторов	514
§ 146. Автотрансформатор	517
Глава XXVII. Цепь переменного тока с приложенным несинусоидальным напряжением	519
§ 147. Применение ряда Фурье к исследованию сложных периодических колебаний	—
§ 148. Режим в цепи при приложенном к ней несинусоидальном напряжении	525
§ 149. Резонанс напряжений в цепи при несинусоидальном приложенном напряжении	529
§ 150. Понятие об электрических фильтрах	531
Глава XXVIII. Выпрямители переменного тока	535
§ 151. Общие положения	—
§ 152. Кенотрон	536
§ 153. Ртутные выпрямители	544
§ 154. Медно-закисный выпрямитель	547
§ 155. Селеновый выпрямитель	548
§ 156. Вибрационный преобразователь	550
Глава XXIX. Электромагнитное поле	553
§ 157. Краткие сведения из истории развития учения об электромагнитном поле	—
§ 158. Электромагнитное поле	555

	Стр.
§ 159. Свободное электромагнитное поле	559
§ 160. Энергия электромагнитного поля	563
§ 161. Плоские электромагнитные волны в однородном диэлектрике	565
§ 162. Плоские волны в проводящей среде	570
§ 163. Стационарное электромагнитное поле	574
§ 164. Поверхностный эффект	579

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Глава XXX. Электрические измерительные приборы	582
§ 165. Значения электрических измерений	—
§ 166. Классификация электроизмерительных приборов по принципу их действия	583
§ 167. Классификация электроизмерительных приборов по роду измеряемой величины	585
§ 168. Классификация электроизмерительных приборов по степени их точности	—
§ 169. Чувствительность и постоянная прибора	586
§ 170. Мощность потерь энергии в приборах	587
§ 171. Приборы магнитоэлектрической системы	—
§ 172. Приборы электродинамической системы	591
§ 173. Приборы электромагнитной системы	595
§ 174. Приборы электростатической системы	597
§ 175. Приборы термоэлектрической системы	598
§ 176. Приборы вибрационной системы	601
§ 177. Электродинамические счетчики	602
§ 178. Индукционные счетчики	604
Глава XXXI. Электрические измерения	606
§ 179. Измерение величины тока	—
§ 180. Измерение напряжения	609
§ 181. Измерение сопротивлений методом амперметра и вольтметра	611
§ 182. Измерение больших сопротивлений методом вольтметра	614
§ 183. Измерение сопротивлений омметром	616
§ 184. Измерение сопротивлений методом мостика	618
§ 185. Типы мостиков	621
§ 186. Измерение мощности электрического тока	627
§ 187. Измерение электрической энергии	629

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Глава XXXII. Аккумуляторы	631
§ 188. Принцип действия аккумуляторов	—
§ 189. Щелочные аккумуляторы	637
§ 190. Эксплуатация щелочных аккумуляторов	645
§ 191. Кислотные (свинцовые) аккумуляторы	648
§ 192. Эксплуатация кислотных аккумуляторов	656
Глава XXXIII. Гальванические элементы	660
§ 193. Общие положения	—
§ 194. Гальванические элементы с марганцовой деполяризацией	661
§ 195. Гальванические элементы с марганцово-воздушной деполяризацией	666

	Стр.
Глава XXXIV. Соединение химических источников электрической энергии в батареи	668
§ 196. Общие положения	—
§ 197. Последовательное соединение химических источников электрической энергии (элементов)	669
§ 198. Параллельное соединение химических источников электрической энергии (элементов)	672
§ 199. Смешанное соединение химических источников электрической энергии (элементов)	674
§ 200. Аккумуляторные батареи	677
§ 201. Заряд аккумуляторных батарей	679
§ 202. Батареи гальванических элементов	681
§ 203. Анодные батареи галетно-пленочной конструкции	682

ЧАСТЬ ПЯТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Глава XXXV. Генераторы постоянного тока	684
§ 204. Общие сведения	—
§ 205. Принцип действия генераторов постоянного тока	—
§ 206. Основные части генератора постоянного тока	687
§ 207. Обмотки генераторов постоянного тока	690
§ 208. Реакция якоря	694
§ 209. Электродвижущая сила генератора постоянного тока	696
§ 210. Мощность и коэффициент полезного действия генераторов постоянного тока	697
§ 211. Классификация генераторов постоянного тока по способу их возбуждения и понятие об их основных характеристиках	699
§ 212. Генератор постоянного тока с независимым возбуждением	700
§ 213. Генератор с параллельным возбуждением	705
§ 214. Генератор с последовательным возбуждением	710
§ 215. Генератор со смешанным возбуждением	711
§ 216. Параллельная работа генераторов постоянного тока	716
§ 217. Параллельная работа генератора постоянного тока с аккумуляторной батареей	718
Глава XXXVI. Электродвигатели постоянного тока	723
§ 218. Принцип действия электродвигателя постоянного тока	—
§ 219. Вращающий момент, мощность и коэффициент полезного действия электродвигателя	725
§ 220. Противозлектродвижущая сила электродвигателя	727
§ 221. Реакция якоря электродвигателя	729
§ 222. Влияние механической нагрузки на режим работы электродвигателя	730
§ 223. Электродвигатель с последовательным возбуждением	732
§ 224. Электродвигатель с параллельным возбуждением	736
§ 225. Электродвигатель со смешанным возбуждением	741
Глава XXXVII. Генераторы переменного тока	743
§ 226. Устройство синхронных генераторов	—
§ 227. Режим работы синхронного генератора	747
§ 228. Параллельная работа синхронных генераторов	752
Глава XXXVIII. Электродвигатели переменного тока	758
§ 229. Синхронный электродвигатель	—
§ 230. Асинхронный электродвигатель	763
Приложение	776

Дмитрий Георгиевич Максимов
КУРС ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Редактор полковник *Кириенко П. С.*
Технический редактор *Соломоник Р. Л.* Корректор *Рослова Н. П.*

Слано в набор 14.5.57 г. Подписано к печати 9.1.58 г.
Формат бумаги 60×92¹/₁₆ 49¹/₄ печ. л. = 49,25 усл. печ. л. 46,344 уч.-изд. л.
Г-41031

Военное Издательство Министерства обороны Союза ССР
Москва, Тверской бульвар, 18
Изд. № 5/7717 Зак. № 1377

2-я типография им. К. Е. Ворошилова
Управления Военного Издательства Министерства обороны СССР
Ленинград — Центр-1, Дворцовая пл., 10

Цена 14 р. 90 к.

Цена 14 р. 90 к.