

ДМ. Н. ЮСКЕВИЧЪ,

ИНЖЕНЕРЪ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ ИИСТ. ПУТЕЙ СООБЩ. ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I.

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.



ПЕТРОГРАДЪ.

Типографія „Якорь“, Б. Болотная, 10.

1917.

Печатано по распоряженію Инст. Пиж. Путей Сообщенія
Императора АЛЕКСАНДРА І.

ОГЛАВЛЕНІЕ.

	СТР.
Введение	1
Постоянный токъ	3
Законъ Ома	3
„ Кирхгофа	4
Потери энергіи на нагреваніе	6
Магниты	8
Электромагниты	10
Магнитная индукція	15
Законъ Ома для магнетизма	17
Электромагнитная цѣпь динамо-машинъ	19
Гистерезисъ	23
Электродвижущая сила индукціи	24
Возбужденіе электродвижущей силы въ якорѣ динамо-машины	27
Типы якорей	31
Электродвижущая сила динамо-машины	36
Токи Фуко	37
Возбужденіе динамо-машинъ	38
Реакція якоря	40
Динамо-машина съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ при переменнѣйшей нагрузкѣ	42
Динамо-машина съ параллельнымъ возбужденіемъ при переменнѣйшей нагрузкѣ	44
Коэффициентъ полезнаго дѣйствія динамо-машинъ	46
Электродвигатели постоянного тока	47
Вращающій моментъ, число оборотовъ и мощность электродвигателей постоянного тока	49
Электродвигатели постоянного тока съ параллельнымъ возбужденіемъ	52
Электродвигатели постоянного тока съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ	54
Аккумуляторы	55
Переменнѣйшій токъ	58
Однофазный токъ	58
Эффективныя значенія напряженій и тока	63
Электродвижущая сила самоиндукціи	66
Законъ Ома для переменнаго тока	68
Мощность или энергія переменнаго тока	69

	СТР.
Емкостное напряжение	70
Способъ трехъ вольтметровъ	73
Способъ трехъ амперметровъ	74
Трехфазный токъ	75
Соединеніе звѣздой	77
Соединеніе треугольникомъ	79
Энергія въ цѣни трехфазнаго тока	82
Трансформаторъ	84
Трансформаторъ при безындуктивной нагрузкѣ	87
Трансформаторъ при индуктивной нагрузкѣ	90
Разсѣиваніе линій силъ въ трансформаторѣ	92
Электрическая тяга	97
Постоянный токъ	97
Однофазный токъ	99
Трехфазный токъ	101
Проектированіе электрической тяги	103
Расчетъ электрическихъ проводовъ	117
Электрическое освѣщеніе	126
Лампы накаливанія	126
Дуговые фонари	127
Телеграфія	132
Телеграфированіе по проводамъ	132
Система Морзе	132
Система Уитстона	135
Система Юза	137
Многократная телеграфія	137
Телеграфированіе безъ проводовъ	140
Телефонія	146
Телефонъ	146
Микрофонъ	147
Одновременное телеграфированіе и телефонированіе по одному про- воду	150
Телефонныя линіи	152

инж. В. Екземпляр

Введение.

Электротехника представляет собой практическое применение электрических и магнитных явлений. Эти явления изучены путем опытов и на основании последних установлены точные законы, по которым происходят эти явления.

Самая сущность упомянутых явлений до сих пор, однако, не установлена и объяснения явлений основаны на гипотезах, которые совершенствуются по мере появления новых открытий и исследований в области электрических и магнитных явлений.

Съ 1900 г. господствуетъ электронная теорія, въ основѣ которой лежитъ представленіе, что каждый іонъ, являющійся результатомъ распада молекулы на двѣ опредѣленныя части, называемыя іонами, — связанъ съ нѣкоторымъ количествомъ электричества. Каждый одноэквивалентный іонъ содержитъ одно и то же количество электричества, являющееся элементарнымъ зарядомъ или атомомъ электричества и именуемое электрономъ.

Электрический токъ, согласно этой теоріи, есть потокъ электроновъ, который вызывается дѣйствіемъ на электроны электрическаго поля (электрическихъ силъ), являющагося въ свою очередь результатомъ разности потенціаловъ. При своемъ движеніи электроны сталкиваются съ молекулами и это и является причиной электрическаго сопротивленія.

Какъ извѣстно изъ физики, потенціалъ точки электрическаго поля равенъ работѣ электрическихъ силъ, при переходѣ единицы электричества изъ этой точки въ безконечность или работѣ внѣшнихъ силъ, при переходѣ единицы электричества изъ безконечности въ эту точку.

Такъ, если шаръ заряженъ положительнымъ электричествомъ и на его поверхности находится свободное тѣло, заряженное единицей также положительнаго электричества, то, такъ какъ одноименныя электричества отталкиваются, упомянутое тѣло будетъ оттолкнуто въ безконечность, на что будетъ затрачена работа

электрическихъ силъ, равная суммѣ произведеній изъ силы отталкиванія на путь.

Потенціалъ въ точкѣ *A*, которая находится ближе къ шару, будетъ очевидно больше, нежели въ точкѣ *B*, отстоящей дальше отъ шара, т. е. между точками *A* и *B* будетъ дѣйствовать разность потенціаловъ, опредѣляемая, какъ работа электрическихъ силъ при переходѣ единицы электричества изъ точки *A* въ точку *B*.

Причина возникновенія разности потенціаловъ называется электродвижущей силой.

Электродвижущая сила *e* получается или при помощи магнитной индукціи при движеніи проводниковъ въ магнитномъ полѣ, какъ это будетъ подробно выяснено ниже, или при помощи химическихъ процессовъ (гальваническіе элементы, аккумуляторы).

Единицей измѣренія электродвижущей силы является вольтъ равный 10^8 CGS (абсолютн. един.).

Электрическій токъ появляется въ цѣпи изъ токопроводящаго матеріала, когда въ этой цѣпи дѣйствуетъ электродвижущая сила и цѣпь замкнута. Токъ, сохраняющій постоянство направленія, называется постояннымъ, а токъ періодически (нѣсколько разъ въ единицу времени) мѣняющій направленіе, называется переменнымъ.

Сила электрическаго тока *i* опредѣляется какъ количество электричества, проходящее черезъ сѣченіе проводника въ секунду. Единицей измѣренія служитъ амперъ, равный 0,1 CGS.

Количество электричества, проходящее черезъ сѣченіе проводника въ теченіе одной секунды, при силѣ тока, равной одному амперу, называется кулономъ $= 0,1$ CGS.

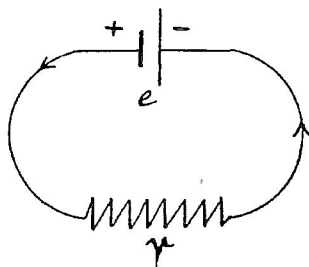
Постоянный токъ.

Законъ Ома.

Если въ замкнутой цѣпи (черт. 1), состоящей изъ токопроводящаго матеріала, имѣется электродвижущая сила, получаемая, напримѣръ, отъ элемента, разность потенциаловъ у борновъ котораго равняется e вольтъ, то въ цѣпи циркулируетъ токъ i амперъ, прямо пропорціональный электродвижущей силѣ e и обратно пропорціональный сопротивленію цѣпи r , т. е.

$$i = \frac{e}{r}$$

или $e = ir$.



Черт. 1.

Сопротивленіе проводника r , выражаемое въ омахъ (омъ $= 10^9$ CGS), прямо пропорціонально его длинѣ l , удѣльному сопротивленію ρ , т. е. сопротивленію проводника длиной въ 1 метръ и сѣченіемъ въ 1 кв. мм., и обратно пропорціонально сѣченію проводника s .

$$r = \frac{\rho l}{s}.$$

Если въ вышеупомянутой цѣпи e или r подобраны такимъ образомъ, что $i = 1$ амперу, то

$$e = r = \frac{\rho l}{s}.$$

Согласно предыдущему, электродвижущая сила e есть работа, затрачиваемая на перемѣщеніе единицы электричества по проводнику между точками, между которыми имѣется разность потенциаловъ $= e$. Выраженіе $\frac{\rho}{s}$ представляетъ собою сопротивленіе

1 метра проводника цѣпи. Электродвижущая сила e расходуется такимъ образомъ на преодоленіе силы сопротивленія $\frac{\rho}{s}$ на протяженіи l .

Если сила тока въ цѣпи равна i амперъ, то для перемѣщенія въ i разъ большаго количества электричества требуется затратить въ i разъ большую силу, т. е. $\frac{i\rho}{s}$, и, слѣдовательно, работа, затрачиваемая на перемѣщеніе количества электричества, отвѣчающаго силѣ тока i , будетъ:

$$e = \frac{i\rho}{s} l = ir.$$

Что касается работы, совершаемой токомъ, то, какъ показываетъ опытъ, она равняется произведенію силы тока i на электродвижущую силу e за промежутокъ времени t , т. е.

$$W = e \cdot i \cdot t.$$

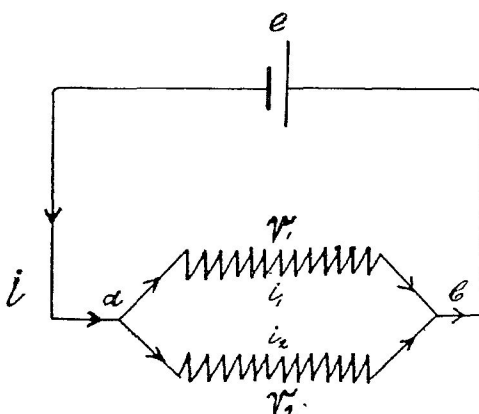
Единица электрической работы измѣряется джаулемъ $= 10^7$ CGS. Электрическая работа, совершенная въ единицу времени (секунду), представляетъ собою мощность

$$P = ei.$$

Единицей измѣренія электрической мощности является ваттъ $= 10^7$ CGS.

Законъ Кирхгофа.

Если въ цѣпи (черт. 2), въ которой дѣйствуетъ электродвижущая сила e , включены параллельно другъ другу два



Черт. 2.

или нѣсколько сопротивленій r_1 r_2 , то въ точкахъ развѣтвленія a и b токъ, протекающій въ точку развѣтвленія, равенъ суммѣ токовъ, расходящихся, и обратно (1 законъ Кирхгофа).

На основаніи этого закона и закона Ома можетъ быть опредѣлено общее сопротивление, составляющееся изъ двухъ параллельныхъ сопротивленій r_1 и r_2 .

Общая сила тока i въ цѣпи равняется суммѣ токовъ въ развѣтвленіяхъ, т. е.

$$i = i_1 + i_2.$$

По закону Ома

$$i_1 = \frac{e}{r_1}; \quad i_2 = \frac{e}{r_2}; \quad i = \frac{e}{r}.$$

Подставляя въ вышеуказанное уравненіе соотвѣтствующія значенія i_1 i_2 i , и имѣя въ виду, что разность потенциаловъ между точками a и b одна и та же во всѣхъ трехъ случаяхъ, получаемъ

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

Кромѣ того, такъ какъ

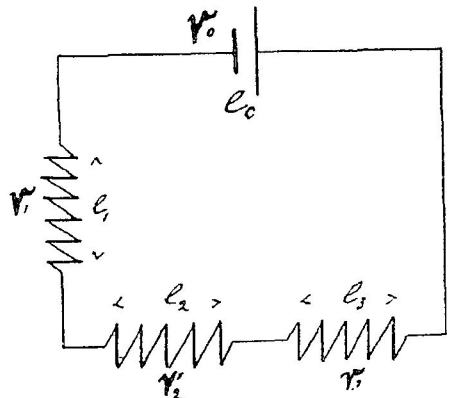
$$e = i_1 r_1 = i_2 r_2,$$

то

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1},$$

т. е. сила тока въ развѣтвленіяхъ обратно пропорціональна сопротивленіямъ.

Если въ цѣпь, въ которой дѣйствуетъ электродвижущая сила e_0 , напр. отъ элемента, внутреннее сопротивление коего r_0 , включены послѣдовательно нѣсколько сопротивленій r_1 r_2 r_3 (черт. 3), то электродвижущая сила e_0 идетъ на преодоленіе суммы всѣхъ этихъ сопротивленій. До замыканія цѣпи e_0 представляетъ собою разность потенциаловъ у борновъ элемента. Когда цѣпь замкнута и въ цѣпи установился токъ силой i амперъ, то часть электродвижущей силы, равная ir_0 , идетъ на преодоленіе внутренняго сопротивленія и поэтому напряжение у борновъ элемента понижается до величины $e = e_0 - ir_0$.



Черт. 3.

Сопротивленія r_1 r_2 r_3 поглощаютъ въ свою очередь соотвѣтственные части e , равныя ir_1 , ir_2 , ir_3 и, слѣдовательно,

$$e = ir_1 + ir_2 + ir_3.$$

Вообще, въ замкнутой цѣпи сумма произведеній тока на послѣдовательно включенныя сопротивленія равна алгебраической суммѣ дѣйствующихъ въ цѣпи электродвижущихъ силъ (2-й законъ Кирхгофа).

Потери энергіи на нагрѣваніе.

При прохожденіи тока i по проводнику, сопротивленіе котораго r_1 (черт. 3), происходитъ нагрѣваніе проводника, т. е. часть электрической энергіи теряется на нагрѣваніе. Количество этой энергіи равняется, согласно предыдущему, произведенію электродвижущей силы e_1 , идущей на преодоленіе сопротивленія r_1 , на силу тока i

$$P = e_1 i.$$

Такъ какъ

$$e_1 = r_1 i,$$

то

$$P = i^2 r_1 \text{ (законъ Джауля).}$$

Токъ отъ источника электрической энергіи, напр. динамо-машины, подводится по проводамъ къ источникамъ потребленія электрической энергіи, напр. лампамъ накаливанія. Нагрѣваніе послѣднихъ является полезнымъ нагрѣваніемъ, а нагрѣваніе подводящихъ проводовъ—безполезной потерей энергіи. Для уменьшенія послѣдней можно или уменьшать сопротивленіе подводящихъ проводовъ или уменьшать въ нихъ силу тока. Уменьшеніе сопротивленія можетъ быть достигнуто только за счетъ увеличенія сѣченія проводовъ, согласно выраженія

$$r = \frac{\rho l}{s},$$

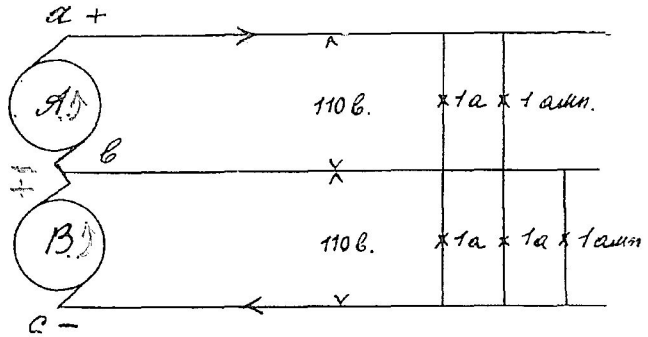
такъ какъ длина проводовъ l и удѣльное сопротивленіе ρ для каждого даннаго случая величины постоянныя. Увеличеніе сѣченія проводовъ сопряжено, однако, съ излишнимъ расходомъ на мѣдь. Поэтому болѣе выгоднымъ представляется уменьшать силу тока, при условіи, однако, сохраненія количества передаваемой энергіи, т. е. P .

Такъ какъ $P = ei$, то при уменьшеніи i необходимо одновременно увеличивать электродвижущую силу e .

При передачѣ энергіи на разстояніи при помощи постоянного тока, напряженіе на центральной станціи должно сообразоваться

съ напряженіемъ, на которое сконструированы источники потребленія тока (лампы накаливанія, напр., изготовляются, большею частью, для напряженія въ предѣлахъ 110 вольтъ). Необходимость удовлетворенія обоимъ этимъ требованіямъ одновременно, т. е. увеличенію напряженія въ линии передачи и ограниченію этого напряженія напряженіемъ источниковъ потребленія, вызвала примѣненіе и распространеніе такъ называемой трехпроводной системы съ нулевымъ проводомъ (черт. 4).

На центральной станціи соединяются послѣдовательно двѣ динамо-машины, при чемъ напряженіе каждой изъ нихъ отвѣчаетъ напряженію источниковъ тока, напр., лампъ накаливанія. Рабочіе про-



Черт. 4.

вода идутъ отъ борновъ машинъ *a* и *c* и напряженіе между этими проводами равняется удвоенному напряженію каждой отдѣльной машины. Кромѣ того, отъ соединенныхъ вмѣстѣ борновъ *b* идетъ нулевой или нейтральный проводъ. Напряженіе между нимъ и каждымъ изъ крайнихъ проводовъ равняется напряженію одной динамо-машины, а за вычетомъ потери на преодолѣніе сопротивленія въ проводахъ, слѣдовательно и напряженію источниковъ потребленія тока. Послѣдніе включаются по возможности равномерно въ каждую изъ двухъ группъ проводовъ, составляемыхъ нулевымъ и однимъ изъ крайнихъ проводовъ. На случай неравномерной нагрузки этихъ группъ и предвидѣн нулевой проводъ, который отводитъ или подводитъ къ источникамъ потребленія тока разность токовъ въ крайнихъ проводахъ. Такъ, на примѣръ, для случая нагрузки сѣти, изображеннаго на черт. 4, распределеніе токовъ представляется въ слѣдующемъ видѣ: отъ борна *a* идетъ 2 ампера, къ борну *c* идетъ 3 ампера, поэтому по нулевому проводу отъ машинъ къ источникамъ потребленія энергіи должно идти 1 амперъ. Слѣдовательно, динамо-машина *A* нагружена 2 амперами, а *B* — 3 амперами. Въ виду вспомогательнаго значенія нулевого провода его дѣлаютъ въ половину меньшаго сѣченія рабочаго провода. Экономія на мѣди при трехпроводной системѣ, по сравненію съ двухпроводной, составляетъ около 65% отъ вѣса

мѣди при двухпроводной системѣ. Дѣйствительно, если черезъ v обозначить вѣсъ одного провода при двухпроводной системѣ, то вѣсъ провода при трехпроводной системѣ $\frac{a}{4}$, такъ какъ при вдвое большемъ напряженіи въ два раза меньше сила тока и, при той же потерѣ энергіи P въ проводахъ, $r = \frac{P}{i^2}$ въ 4 раза больше, а сѣченіе провода s во столько же разъ меньше. Общій вѣсъ проводовъ въ первомъ случаѣ $2a$, во второмъ $\frac{a}{4} + \frac{a}{4} + \frac{a}{4} = \frac{3}{4}a$.

Магниты.

Магнитомъ называется стальная полоса, имѣющая свойство притягивать желѣзо. Если магнитъ опустить въ желѣзныя опилки, то опилки пристанутъ наиболѣе густо къ концамъ магнита, что обнаруживаетъ въ этихъ мѣстахъ дѣйствіе притягательныхъ силъ наибольшей величины. Мѣста эти называются полюсами, при чемъ въ зависимости отъ ихъ свойства ориентироваться по меридіану, полюса получаютъ названіе сѣвернаго и южнаго.

Сила f взаимодѣйствія полюсовъ различныхъ магнитовъ, какъ показываетъ опытъ, прямо пропорціональна ихъ магнитной массѣ $m_1 m_2$ или силѣ полюсовъ и обратно пропорціональна квадрату разстоянія между ними r , при чемъ одноименные полюса отталкиваются, а разноименные притягиваются.

$$f = \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

Если $m_2 = 1$ и $r = 1$, то $f = m$, т. е. сила магнитнаго полюса m опредѣляется силой дѣйствія его на магнитный полюсъ $= 1$, находящійся отъ него въ разстояніи 1 см. Такимъ образомъ, въ пространствѣ, окружающемъ магнитный полюсъ, дѣйствуютъ магнитныя силы. Это пространство называется магнитнымъ полемъ. Сила магнитнаго поля, согласно вышесказаннаго, уменьшается съ удаленіемъ отъ полюса. Сила эта, обозначаемая буквой H , характеризуется силой f , которая дѣйствуетъ въ разсматриваемой точкѣ поля на помѣщенный въ этой точкѣ полюсъ $= 1$, т. е.

$$f = H.$$

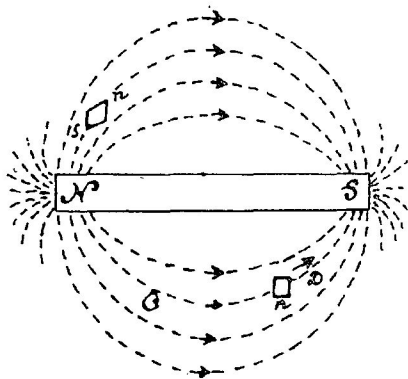
Съ другой стороны, когда поле H создается полюсомъ m и въ разстояніи r отъ послѣдняго находится полюсъ $= 1$,

$$f = \frac{m \cdot 1}{r^2}.$$

Отсюда

$$H = \frac{m}{r^2}.$$

Наличіе въ пространствѣ, окружающемъ магнитный полюсъ, магнитнаго поля, характеризующагося дѣйствіемъ въ немъ магнитныхъ силъ, подтверждается слѣдующимъ опытомъ. Если на магнитъ H (черт. 5) черезъ сито сыпать желѣзныя опилки, потряхивая доску, на которой лежитъ магнитъ, то опилки расположатся по кривымъ, показаннымъ на чертѣжѣ пунктиромъ. Опилки, попадая въ сферу магнитнаго поля, сами становятся магнетиками, которые, сцѣпляясь между собою разноименными полюсами, располагаются по направленію дѣйствія магнитныхъ силъ. Эти кривыя называются линіями силъ и условно принимается, что линіи силъ выходятъ изъ сѣвернаго полюса и входятъ въ южный, образуя замкнутыя кривыя, что отвѣчаетъ направленію перемѣщенія свободнаго сѣвернаго полюса въ магнитномъ полѣ. Линіи силъ, выходя изъ сѣвернаго полюса, расходятся равномерно во всѣ стороны и направляются къ южному полюсу, образуя какъ бы сферическія поверхности.



Черт. 5.

Линіи силъ не только обозначаютъ направленіе магнитныхъ силъ, но и служатъ для опредѣленія силы магнитнаго поля.

Представимъ себѣ, что вокругъ магнитнаго полюса, какъ центра, описано нѣсколько концентрическихъ шаровыхъ поверхностей. Линіи силъ, исходя изъ полюса, проходятъ послѣдовательно черезъ концентрическія поверхности и, такъ какъ послѣднія относятся какъ квадраты ихъ радіусовъ, то число линій силъ, приходящееся на квадратный сантиметръ шаровой поверхности, измѣняется обратно пропорціонально квадрату радіусовъ. Такимъ образомъ, сила магнитнаго поля H можетъ быть охарактеризована, какъ число линій силъ, приходящееся на квадратный сантиметръ.

Изъ условія, чтобы оба вышеприведенныя опредѣленія силы магнитнаго поля, а именно. сила, дѣйствующая на полюсъ $= 1$, и число линій силъ на квадратный сантиметръ, давали бы одно и то же число, вытекаетъ опредѣленіе для единицы линій силъ. Линія силъ есть такой силовой потокъ, который, исходя изъ по-

люса $\equiv 1$, проходить черезъ квадратный сантиметръ шаровой поверхности, описанной радіусомъ въ 1 см.

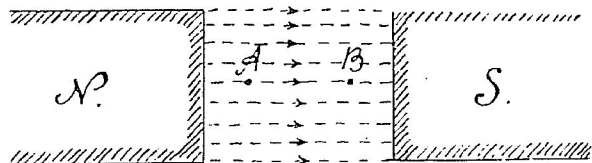
А такъ какъ поверхность шара равна $4\pi r^2$, то для $r = 1$ см. поверхность равна 4π кв. см. Принимая во вниманіе, что черезъ квадратный сантиметръ проходитъ одна линія силъ, общее количество линій силъ, исходящее изъ сѣвернаго полюса $\equiv 1$, составляетъ 4π линій силъ.

Общее количество линій силъ N , исходящее изъ полюса m , равняется $N = 4\pi m$, а общее количество линій силъ, проходящее черезъ поверхность S , при силѣ поля H

$$N = HS.$$

Сѣверный свободный полюсъ n (черт. 5), помѣщенный въ магнитное поле, будетъ перемѣщаться отъ N къ S подъ дѣйствіемъ силы магнитнаго поля по пути, обозначенному стрѣлкой. При этомъ совершается работа, равная произведенію упомянутой силы на пройденный путь. Подобно тому, какъ электрическій потенциалъ опредѣляется работой, затрачиваемой на перемѣщеніе въ электрическомъ полѣ единицы электричества, такъ работой затрачиваемой на перемѣщеніе въ магнитномъ полѣ магнитнаго полюса $\equiv 1$, опредѣляется магнитный потенциалъ.

Въ равномерномъ магнитномъ полѣ, въ которомъ линіи силъ параллельны другъ другу (черт. 6), сила $f = H$, дѣйствующая на полюсъ $\equiv 1$, при его перемѣщеніи отъ B къ A , остается постоянной и поэтому



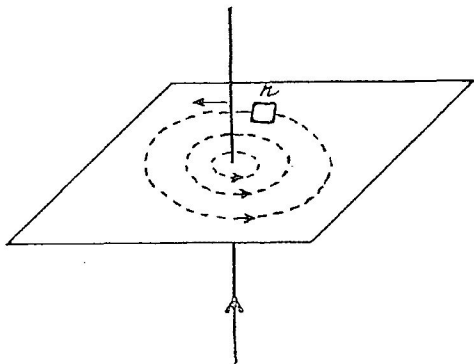
Черт. 6.

разность потенциаловъ между точками A и B , при разстояніи между ними l , опредѣляется произведеніемъ Hl .

Электромагниты.

Опытъ съ желѣзными опилками показываетъ, что если по проводнику проходитъ токъ, то вокругъ проводника образуется магнитное поле, причемъ линіи силъ располагаются вокругъ проводника, концентрическими кругами въ плоскостяхъ, перпендикулярныхъ проводнику (черт. 7). Направленіе линій силъ опредѣляется слѣдующимъ образомъ. Если смотрѣть вдоль проводника

на встрѣчу току, то направленіе линий силъ будетъ обратно направленію часовой стрѣлки и поэтому свободный сѣверный полюсъ, находясь въ упомянутомъ магнитномъ полѣ, будетъ перемѣщаться также противъ часовой стрѣлки. Такъ какъ между проводникомъ и полюсомъ существуетъ взаимодействіе, то, если закрѣпить неподвижно полюсъ, начнетъ перемѣщаться проводникъ и при этомъ въ сторону обратную перемѣщенію своднаго полюса.



Черт. 7.

Въ положеніи полюса n , изображенномъ на черт. 7, при неподвижномъ проводникѣ, полюсъ будетъ перемѣщаться влѣво. Если закрѣпить полюсъ n , то будетъ перемѣщаться проводникъ и при этомъ вправо.

Сила взаимодействія между полюсомъ и элементомъ проводника, какъ показываетъ опытъ, пропорціональна силѣ проходящаго по проводнику тока I , длинѣ элемента dl , силѣ полюса m и обратно пропорціональна квадрату разстоянія r между элементомъ и полюсомъ.

$$df = \frac{m \cdot I \cdot dl}{r^2}.$$

$\frac{m}{r^2}$ согласно предыдущаго представляетъ собою силу поля H .

Поэтому

$$df = H I dl \text{ динъ.}$$

Отсюда сила, дѣйствующая на весь проводникъ длиною l ,

$$f = H \cdot I \cdot l \text{ динъ.}$$

Сила тока I въ этомъ уравненіи выражена въ абсолютныхъ единицахъ.

Если силу тока выразить въ амперахъ, то, такъ какъ

$$i = 10 I \text{ амперъ,}$$

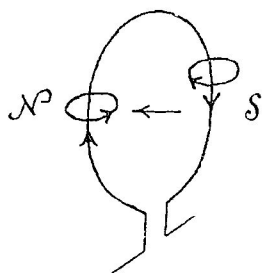
или

$$I = \frac{i}{10},$$

то

$$df = H \cdot \frac{i}{10} \cdot dl.$$

Если токъ проходить по проводнику, изогнутому по кругу (черт. 8) въ направленіи, показанномъ на чертежѣ стрѣлкой, то



Черт. 8.

линіи силъ, образующіяся вокругъ этого проводника, имѣютъ направленіе въ пространствѣ, ограниченномъ проводникомъ, согласно вышеуказаннаго правила, справа налѣво. При этомъ рамка, образуемая проводникомъ, превращается какъ бы въ плоскій магнитъ, южный полюсъ котораго находится справа (линіи силъ входятъ въ рамку), а сѣверный слѣва (линіи силъ выходятъ изъ рамки).

Отсюда правило: если смотрѣть на рамку, по которой токъ идетъ по часовой стрѣлкѣ, то къ наблюдателю обращенъ южный полюсъ, если же токъ идетъ въ направленіи, обратномъ часовой стрѣлкѣ, то сѣверный полюсъ.

Дѣйствіе рамки на полюсъ m , расположенный въ центрѣ рамки, опредѣляется изъ выраженія

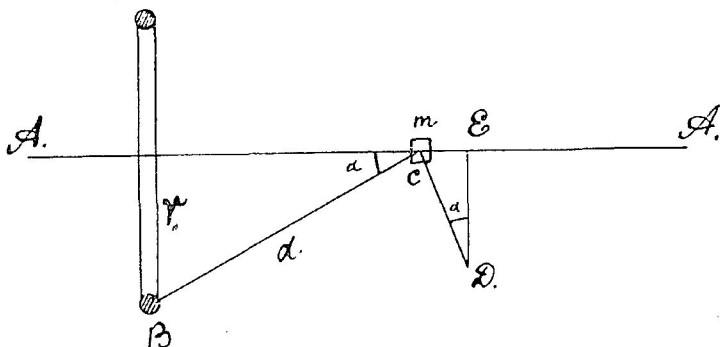
$$df = \frac{m \cdot I \cdot dl}{r^2},$$

гдѣ r разстояніе отъ центра рамки до ея периферіи.

Интегрируя по длинѣ рамки, получаемъ:

$$f = \frac{m \cdot I \cdot 2\pi r}{r^2} = \frac{m \cdot I \cdot 2\pi}{r}.$$

Въ томъ случаѣ, когда полюсъ m находится не въ плоскости рамки, а внѣ ея на линіи AA , проведенной перпендикулярно



Черт. 9.

черезъ ея центръ (черт. 9), то сила взаимодѣйствія элемента рамки и полюса выразится

$$df = \frac{m \cdot I \cdot dl}{a^2},$$

а такъ какъ

$$\alpha = \frac{r}{\sin \alpha},$$

то

$$df = \frac{m \cdot I \cdot dl \cdot \sin^2 \alpha}{r^2}.$$

Направленіе этой силы для разсматриваемаго элемента перпендикулярно линіи BC . Проекція ея на ось AA равняется $df \cdot \sin \alpha$.

Равнодѣйствующая отъ дѣйствія всѣхъ элементовъ рамки на полюсъ опредѣляется какъ $\Sigma df \cdot \sin \alpha$, т. е.

$$f = \Sigma df \cdot \sin \alpha = \frac{m \cdot I \cdot \sin^3 \alpha}{r^2} \cdot \Sigma dl$$

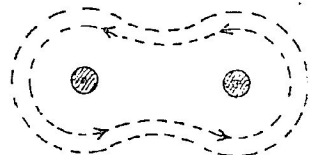
$$\Sigma dl = 2 \pi r$$

$$f = \frac{2 \pi \cdot m \cdot I}{r} \cdot \sin^3 \alpha.$$

Сила магнитнаго поля H въ точкѣ C , опредѣляемая какъ сила, дѣйствующая въ точкѣ C на полюсъ $= 1$, получается изъ послѣдняго уравненія, приравнивая $m = 1$.

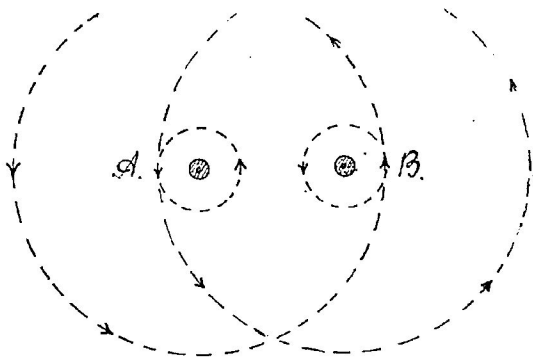
$$H = \frac{2 \pi I}{r} \cdot \sin^3 \alpha.$$

Опытъ съ желѣзными опилками показываетъ, что, если по двумъ параллельнымъ, рядомъ расположеннымъ проводамъ, токъ идетъ въ одиомъ и томъ же направленіи, то силовыя линіи принимаютъ охватывающее положеніе (черт. 10).



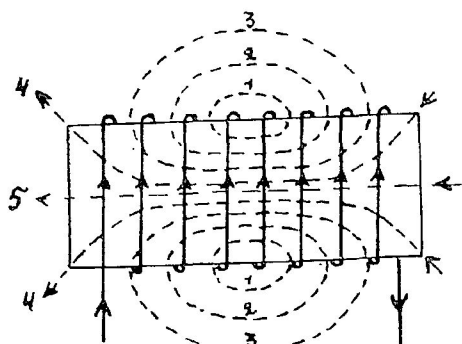
Черт. 10.

На этомъ чертежѣ проводники изображены въ разрѣзѣ, а точками въ центрѣ проводниковъ обозначены острія стрѣлокъ, показывающихъ направленіе тока, т. е. по направленію къ наблюдателю. Такое охватывающее положеніе линій силъ обусловливается тѣмъ, что линіи силъ въ промежуткѣ между проводниками (черт. 11) направлены навстрѣчу другъ другу и поэтому взаимно уничтожаются. Линіи же силъ снаружи проводниковъ направлены въ одну и ту же сторону и поэтому суммируются



Черт. 11.

Если проволока, по которой проходит токъ, свернута въ спираль въ видѣ катушки (черт. 12), то черезъ плоскость каждаго витка катушки проходятъ какъ линіи силъ, возбуждаемая токомъ

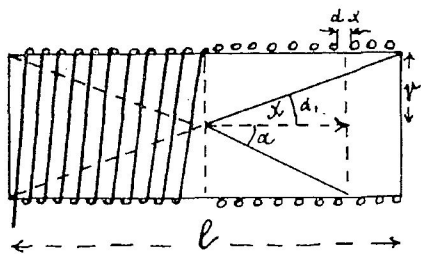


Черт. 12.

въ данномъ виткѣ, такъ и линіи силъ, возбуждаемая сосѣдними витками. Внутри катушки линіи силъ проходятъ болѣе или менѣе параллельно и, выйдя изъ нея, замыкаются сами на себя въ отдѣльные контуры. Контуръ линій силъ 1,1 создается двумя средними витками, контуръ 3,3 — шестью средними витками, силовые же линіи 4,4 и 5 — соединеннымъ дѣйствіемъ всѣхъ витковъ. Наибольшая

плотность линій силъ — въ серединѣ катушки, къ концамъ же катушки плотность линіи силъ уменьшается. Въ этомъ отношеніи рассматриваемая катушка, называемая обыкновенно соленоидомъ, отвѣчаетъ обыкновенному магниту.

Отмѣченная неравномерность въ распредѣленіи линій силъ внутри соленоида обуславливаетъ свойство такого втягивать въ себя желѣзный сердечникъ. Желѣзо въ магнитномъ полѣ стремится принять такое положеніе, въ которомъ черезъ него проходило бы наибольшее число линій. Если предположимъ, что желѣзный сердечникъ вдвинуть наполовину въ соленоидъ, то линіи силъ, войдя въ центрѣ соленоида въ желѣзный сердечникъ, стремятся остаться въ сердечникѣ и, вслѣдствіе этого, путь ихъ удлинится по сравненію съ нормальнымъ путемъ. Сила, направленная къ сокращенію пути линій силъ, вызываетъ въ результатъ втягиваніе желѣзнаго сердечника. На этомъ свойствѣ соленоидовъ основано устройство наиболѣе употребительныхъ измѣрительныхъ приборовъ, какъ то: гальванометровъ, амперметровъ и вольтметровъ.



Черт. 13.

Опредѣлимъ плотность линій силъ или силу магнитнаго поля (H) въ центрѣ соленоида.

Если число витковъ въ соленоидѣ n , а сила тока, циркулирующаго по виткамъ I , то магнитное дѣйствіе такого соленоида равносильно токопроводящей полосѣ шириной l (черт. 13), по

которой проходить равномерно по всей ширинѣ полосы токѣ, силой въ nI . Сила тока по кольцевому отрѣзку dx полосы l выразится, слѣдовательно, въ $\frac{nI \cdot dx}{l}$.

Дѣйствіе этого отрѣзка на единичный полюсъ, помѣщенный въ центрѣ соленоида, согласно предыдущаго, опредѣляется въ

$$dH = \frac{2\pi nI}{r} \cdot \frac{dx}{l} \cdot \sin^3 \alpha.$$

Такъ какъ

$$x = r \operatorname{ctg} \alpha,$$

$$\text{то } dx = -\frac{r}{\sin^2 \alpha} \cdot d\alpha.$$

Подставляя въ предыдущее уравненіе эти значенія для x , интегрируемъ въ предѣлахъ отъ $\pi - \alpha_1$ до $+\alpha_1$:

$$H = - \int_{\pi - \alpha_1}^{+\alpha_1} \frac{2\pi nI}{l} \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{2\pi nI}{l} \left[\cos \alpha \right]_{\pi - \alpha_1}^{+\alpha_1} = \frac{4\pi nI}{l} \cdot \cos \alpha_1.$$

Въ длинныхъ соленоидахъ $\cos \alpha_1$ безъ большой погрѣшности можетъ быть приравненъ 1, слѣдовательно,

$$H = \frac{4\pi nI}{l}.$$

Если выразить силу тока въ амперахъ, то предыдущее выраженіе приметъ видъ

$$H = \frac{0,4\pi ni}{l}.$$

Магнитная индукція.

Число линій силъ, приходящееся на кв. см. въ соленоидѣ, въ томъ случаѣ, когда внутри его помѣщенъ желѣзный сердечникъ, во много разъ превосходитъ, при равныхъ прочихъ условіяхъ, соотвѣтствующее число линій силъ при нахожденіи внутри соленоида только воздуха.

Такимъ образомъ, линіи силъ въ воздухѣ какъ бы индуцируютъ или возбуждаютъ въ желѣзномъ сердечникѣ соленоида число линій силъ въ соотвѣтственно разъ большее, чѣмъ въ воздухѣ.

Въ виду сего сила магнитнаго поля (H) или, что то же, число линій силъ, приходящееся на кв. см. въ воздухѣ называютъ также магнетизирующей силой.

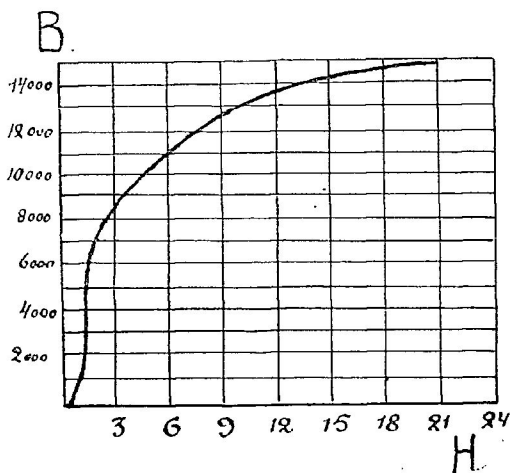
Число линий силъ, приходящееся на кв. см. въ желѣзѣ, называютъ магнитной индукціей и обозначаютъ буквой B .

Свойство желѣза, вызывающее появленіе въ немъ, при одной и той же магнитизирующей силѣ, большого числа линий силъ, нежели въ воздухѣ, носить названіе магнитной проводимости и обозначается буквой μ .

Такимъ образомъ, магнитная проводимость показываетъ, во сколько разъ желѣзо проводитъ линіи силъ лучше, чѣмъ воздухъ.

Отсюда слѣдуетъ, что $B = \mu H$ или $\mu = \frac{B}{H}$.

Магнитная проводимость μ представляетъ собою величину, измѣняющуюся въ зависимости отъ магнитизирующей силы H , причемъ μ уменьшается съ возрастаніемъ H .



Черт. 14.

Откладывая по оси абсциссъ значенія H , а по оси ординатъ значенія B , получаемъ кривую намагничиванія. На черт. 14 приведена кривая намагничиванія для литой стали ¹⁾

Уменьшеніе μ съ возрастаніемъ H обусловливается тѣмъ, что съ увеличеніемъ B происходитъ постепенное насыщеніе желѣза линіями силъ, вслѣдствіе чего для дальнѣйшаго увеличенія B необходимо затрачивать все большую и большую магнетизирующую силу H .

¹⁾ Кривая черт. 14 построена на основаніи слѣдующихъ, полученныхъ измѣреніемъ данныхъ:

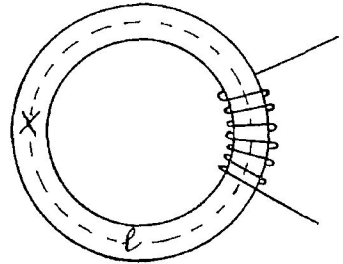
$H =$	0,9	$B =$	1130	$\mu = \frac{B}{H} =$	1260
	1,55		5200		3350
	2,7		8160		3020
	3,75		9480		2530
	8,55		12440		1460
	18,1		14510		800
	34,5		15710		460
	82,7		17150		210
	145,3		18200		130

Законъ Ома для магнитизма.

Въ отношеніи замкнутой магнитной цѣпи, напр., желѣзнаго кольца (черт. 15), безразлично, расположены ли витки обмотки равномѣрно по всей длинѣ кольца или на ея части, какъ показано на черт. 15. Въ обоихъ случаяхъ дѣйствительно уравненіе

$$B = \mu H = \frac{\mu \cdot 0,4\pi \cdot n \cdot i}{l},$$

гдѣ l представляетъ собой уже не длину соленоида, а длину средняго пути линій силъ въ желѣзномъ кольцѣ.



Черт. 15.

Обозначимъ черезъ S поперечное сѣченіе желѣзнаго кольца и чрезъ N общее число линій силъ, проходящее по кольцу, т. е. черезъ сѣченіе S . Величинѣ N присвоено названіе магнитнаго потока. Тогда

$$N = B \cdot S = \frac{\mu \cdot 0,4\pi \cdot n \cdot i \cdot S}{l} = \frac{0,4\pi \cdot n \cdot i}{\frac{l}{\mu S}}$$

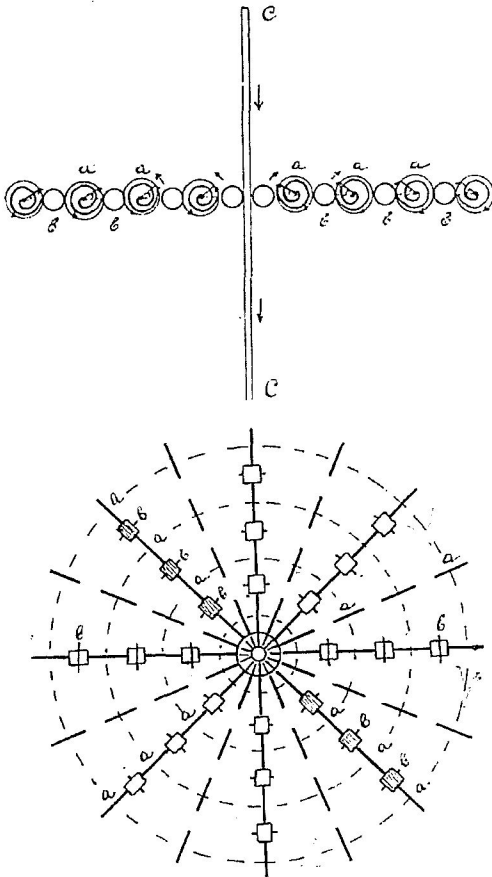
Знаменатель второй половины приведеннаго уравненія, принимая во вниманіе, что проводимость—величина, обратная сопротивленію, имѣетъ видъ, подобный выраженію для электрическаго сопротивленія: $r = \rho \frac{l}{S}$. Поэтому $\frac{l}{\mu S}$ представляетъ собою магнитное сопротивленіе. Отсюда вытекаетъ представленіе, что для образованія въ магнитной цѣпи магнитнаго потока необходимо преодолѣть магнитное сопротивленіе. Давленіе, потребное для преодолѣнія упомянутаго сопротивленія, создается амперъ-витками $n \cdot i$ и величинѣ $0,4\pi \cdot n \cdot i$ присваивается названіе магнитодвижущей силы. Такимъ образомъ, вышеприведенное уравненіе выражаетъ собой законъ:

$$\text{Магнитный потокъ} = \frac{\text{магнитодвижущая сила}}{\text{магнитное сопротивленіе}},$$

т. е. законъ, аналогичный закону Ома.

Слѣдуетъ, однако, имѣть въ виду существенную разницу въ характерѣ физическихъ явленій электрическаго тока и магнитнаго потока. Тогда какъ первый осуществляетъ форму движенія, второй, т. е. магнитный потокъ, представляетъ собою явленіе установленія напряженнаго состоянія среды.

Такъ по одной изъ гипотезъ магнетизма предполагается, что въ желѣзѣ частицы сами по себѣ обладаютъ свойствами магнитовъ. Въ немагнетизованномъ желѣзѣ оси этихъ магнитовъ равномерно-безиорядочно распредѣлены, вслѣдствіе чего дѣйствіе этихъ магнитовъ во внѣшнемъ пространствѣ взаимно уничтожается. Когда же желѣзо помѣститъ въ магнитное поле, то оси молекулярныхъ магнитовъ стремятся повернуться по направленію линій силъ, преодолевая сопротивленіе нѣкоторыхъ внутреннихъ силъ, препятствующихъ повороту молекулярныхъ магнитовъ. Въ зависимости отъ величины напряженности магнитнаго поля, оси молекулярныхъ магнитовъ поворачиваются на большій или меньшій уголъ и остаются въ такомъ положеніи во время дѣйствія магнитнаго поля, а послѣ его исчезновенія возвращаются въ первоначальное положеніе.



Черт. 16.

Физическій характеръ магнитнаго потока можно себѣ представить также на основаніи слѣдующей механической модели. Предположимъ, что рядъ спиральныхъ пружинъ *a* (черт. 16) съ внутренними закрѣпленными концами находятся во взаимодействіи другъ съ другомъ при помощи силы тоенія черезъ посредство свободно вращающихся осей *b*. Пружина *a* окружаютъ стержень *c* по концентрическимъ кругамъ. Если подъ вліяніемъ какой-либо силы стержень *c* начнетъ перемѣщаться вдоль своей оси, то рядъ пружинъ *a*, ближайшій къ стержню *c*, черезъ посредство осей *b* повернутся на опредѣленный уголъ, зависящій съ одной стороны отъ вышеупомянутой силы тренія, съ другой стороны отъ упругости пружинъ. Пружины перваго концентрическаго ряда, поворачиваясь, заставляютъ при помощи осей *b* повернуться на тотъ же уголъ второй коцентрической рядъ пружинъ. Поворотъ пружинъ второго ряда вызываетъ поворотъ пружинъ третьяго ряда и т. д. Такимъ образомъ, окружающіе стержень *c* концентрическими кругами спиральныя пружины поворачиваются на опредѣленный уголъ и остаются въ такомъ напряженномъ состояніи въ теченіе всего времени перемѣщенія стержня *c*. Съ исчезновеніемъ силы, вызывающей перемѣщеніе стержня, пружины повернутся въ нормальное свое положеніе и заставятъ стержень *c* нѣсколько перемѣститься въ обратномъ направленіи.

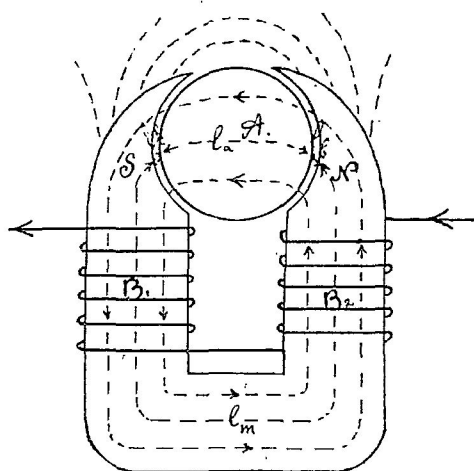
Перемѣщеніе стержня отвѣчаетъ перемѣщенію электрическаго тока по проводнику, а спиральныя пружины характеризуютъ состояніе магнитнаго поля, создаваемого токомъ, при чемъ линіи магнитныхъ силъ совпадаютъ по направленію съ линіями, проходящими черезъ центры спиральныхъ пружинъ соотвѣтствующихъ рядовъ. А такъ какъ совокупность магнитныхъ линій силъ представляетъ собою магнитный потокъ, то послѣдній представляетъ собою извѣстное напряженное состояніе среды. Съ исчезновеніемъ тока въ проводникѣ исчезаетъ и созданное токомъ напряженное состояніе магнитнаго поля.

Электромагнитная цѣпь динамо-машинъ.

Подобно тому, какъ въ электрической цѣпи дѣйствующая въ этой цѣпи электродвижущая сила расходуется на преодоленіе сопротивленій сказанной цѣпи, такъ и въ магнитной цѣпи, отдѣльныя части которой могутъ обладать различнымъ магнитнымъ сопротивленіемъ, въ зависимости отъ матеріала, изъ коего эти части состоятъ (жельзо, чугуны, воздухъ), и ихъ поперечнаго

сѣченія и длины, — дѣйствующая въ цѣпи магнитодвижущая сила расходуется на преодоленіе послѣдовательно включенныхъ въ цѣпь магнитныхъ сопротивленій. При этомъ расположеніе витковъ, при прохожденіи по которымъ тока образуется магнитодвижущая сила, не вліяетъ на послѣднюю, т. е. витки могутъ быть расположены, какъ выше было упомянуто, или въ одномъ мѣстѣ цѣпи или въ разныхъ ея частяхъ.

Какъ ниже будетъ выяснено, работа динамо-машины, имѣющей цѣлью вырабатывать электрическій токъ, основана на возбужденіи электродвижущей силы въ рамкахъ изъ изолированной проволоки при вращеніи таковыхъ въ магнитномъ полѣ. Для полученія магнитнаго поля определенной напряженности, съ помощью возможно наименьшей магнитодвижущей силы ($0,4 \pi \cdot n \cdot i$), необходимо устройство въ динамо-машинѣ такой магнитной цѣпи, которая обладала бы возможно меньшимъ магнитнымъ сопротивленіемъ. Это достигается примѣненіемъ матеріаловъ, обладающихъ хорошою магнитною проницаемостью (μ). Такъ какъ магнитная проницаемость воздуха во много разъ меньше желѣза и чугуна, то динамо-машины конструируются такимъ образомъ, чтобы въ магнитной цѣпи было возможно меньше воздушныхъ промежутковъ. Съ этою цѣлью вращающіяся рамки, въ которыхъ возбуждается электродвижущая сила, наматываются на цилиндръ, составляемый



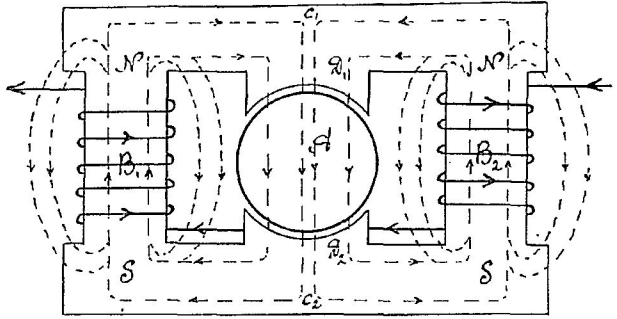
Черт. 17.

изъ желѣзныхъ дисковъ, спрессованныхъ между собою. На чертежахъ 17 (Снменсовскій типъ) и 18 (Манчестерскій типъ) въ разрѣзѣ показаны остовы динамо-машинъ двухъ наиболѣе распространенныхъ типовъ. Вышеупомянутые цилиндры на которыхъ помѣщаются вращающіяся вмѣстѣ съ ними рамки, именуются якори. На чертежахъ они обозначены буквами А. Буквами B_1 B_2 обозначены желѣзные сердечники электромагнитовъ, на каковыя сердечники наса-

живаются катушки (обмотки) электромагнитовъ. Въ типѣ, изображенномъ на чертежѣ 17, катушки соединяются между собою такимъ образомъ, что катушки обращены другъ къ другу разноименными полюсами, вслѣдствіе чего образуется одна магнитная

цѣпи и магнитодвижушія силы обѣихъ катушекъ включены послѣдовательно.

Въ типѣ, изображенномъ на чертежѣ 18, катушки электромагнитовъ обращены другъ къ другу одноименными полюсами, поэтому магнитные потоки, возбуждаемые катушками, встрѣчаясь въ соединительной полосѣ C_1 , поворачиваются черезъ полюсный наконечникъ D_1 , и, суммируясь, проходятъ черезъ воздушный промежутокъ, черезъ якорь, второй воздушный промежутокъ, полюсный наконечникъ D_2 и въ соединительной полосѣ C_2 расходятся, направляясь къ источнику возбужденія магнитныхъ полюсовъ, т. е. къ катушкамъ электромагнитовъ. Послѣднія включены такимъ образомъ параллельно другъ къ другу и въ динамо-машинѣ образованы двѣ магнитныя цѣпи, имѣющія общую часть, а именно, якорь.



Черт. 18.

Какъ показываетъ опытъ, не всѣ линіи силъ, возбужденныя амперъ-витками (ni) катушекъ B_1 B_2 , проходятъ по пути, образуемому желѣзными частями динамо-машины, а нѣкоторая часть ихъ, минуя сердечникъ якоря, замыкается черезъ воздухъ (черт. 17 и 18), т. е. разсѣивается. Такимъ образомъ, если черезъ сердечникъ якоря долженъ проходить магнитный потокъ въ N линій силъ, то число витковъ въ катушкахъ B_1 B_2 и сила тока въ нихъ, т. е. амперъ-витки ni , должны быть подобраны такъ, чтобы въ сердечникахъ электромагнитовъ магнитный потокъ равнялся γN , гдѣ γ представляетъ собою коэффициентъ разсѣиванія. Въ Сименсовскомъ типѣ $\gamma = 1,35$, въ Манчестерскомъ $\gamma = 1,5$.

Для поддержанія въ отдѣльныхъ частяхъ магнитной цѣпи соотвѣтствующихъ магнитныхъ потоковъ затрачиваются соотвѣтствующія магнитныя силы, которыя въ суммѣ должны равняться магнитодвижущей силѣ, развиваемой катушками электромагнитовъ.

Для поддержанія въ сердечникѣ якоря магнитнаго потока N , при средней длинѣ пути линій силъ, равной l_a (черт. 17), поперечномъ къ направленію линій силъ сѣченіи желѣза сердечника S_a и магнитной проводимости μ , потребное число ам-

перъ-витковъ, а, слѣдовательно, магнитодвижущая сила опредѣлится въ

$$0,4 \pi n_a i = N \frac{l_a}{\mu S_a}.$$

Для прохожденія того же магнитнаго потока черезъ двойной воздушный промежутокъ длиной $2l_b$, при сѣченіи промежутка, равномъ поверхности S_b полюснаго наконечника, противолежащей якорю, и $\mu = 1$ (для воздуха), требуется

$$0,4 \pi n_b i = N \frac{2l_b}{S_b}.$$

Для поддержанія въ сердечникѣ электромагнитовъ магнитнаго потока γN , при средней длинѣ пути l_m , поперечномъ сѣченіи сердечника S_m и магнитной проницаемости μ , потребная магнитодвижущая сила опредѣляется въ

$$0,4 \pi n_m i = \gamma N \frac{l_m}{\mu S_m}.$$

Такимъ образомъ, для обезпеченія въ магнитной цѣпи динамо-машины опредѣленнаго магнитнаго потока, катушки электромагнитовъ должны состоять изъ такого количества витковъ — n и по нимъ долженъ проходить такой токъ — i , чтобы было удовлетворено равенство:

$$0,4 \pi n i = N \frac{l_a}{\mu S_a} + N \frac{2l_b}{S_b} + \gamma N \frac{l_m}{\mu S_m} = N \left(\frac{l_a}{\mu S_a} + \frac{2l_b}{S_b} + \gamma \frac{l_m}{\mu S_m} \right).$$

Для полученія потребной магнитодвижущей силы соотношеніе между n и i не имѣетъ значенія, а необходимо лишь, чтобы произведение ni равнялось величинѣ, опредѣляемой изъ приведеннаго равенства. Соотношеніе между n и i зависитъ, однако, отъ величины коэффиціента полезнаго дѣйствія, который желаютъ получить отъ динамо-машины и, въ частности, отъ процента α энергіи P , развиваемой динамо-машиной, который назначается при конструированіи динамо-машины на обращеніе въ тепло по закону Джауля, вслѣдствіе прохожденія тока по виткамъ обмотки электромагнитовъ. Отсюда

$$i^2 r = \frac{\alpha}{100} \cdot P,$$

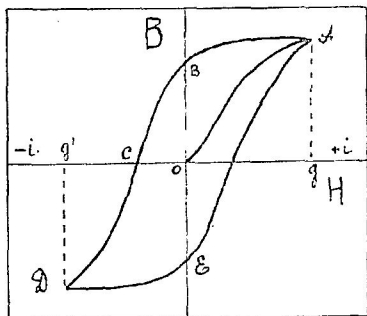
гдѣ i — сила тока въ обмоткѣ электромагнитовъ, а r — сопротивленіе этой обмотки.

Кромѣ того, по закону Ома, $i = \frac{e}{r}$, гдѣ e — напряженіе у борновъ обмотки электромагнитовъ, развиваемое самой динамо-машиной.

Изъ этихъ двухъ уравненій опредѣляется значеніе для i и r , а съ помощью i находится число витковъ электромагнитовъ n .

Гистерезисъ.

Для построенія кривой намагничиванія, какъ выше было упомянуто, по оси абсциссъ откладывается магнитизирующая сила $H = \frac{0,4 \pi \cdot n \cdot i}{l}$, а по оси ординатъ индукція B . Кривая OA (черт. 19) получается, если желѣзо въ ненамагниченномъ состояніи начать постепенно намагничивать помощью усиленія магнитизирующаго тока i отъ O до нѣкоторой величины, отвѣчающей въ соответствующемъ масштабѣ абсциссъ Og . Если затѣмъ магнитизирующий токъ начать уменьшать, то величины индукціи B въ кривой размагничиванія окажутся для однѣхъ и тѣхъ же абсциссъ больше, нежели въ кривой намагничиванія. При уменьшеніи i до O въ желѣзѣ сохраняется индукція $= OB$, т. е.



Черт. 19.

остаточный магнетизмъ. Для низведенія его до O , необходимо переменить направленіе тока въ магнитизирующихъ виткахъ и довести его до величины OC . При дальнѣйшемъ увеличеніи тока $-i$, магнитный потокъ, а слѣдовательно, и индукція въ желѣзѣ мѣняють направленіе. Когда затѣмъ токъ $-i$ уменьшится до O , въ желѣзѣ сохраняется остаточный магнетизмъ, выражаемый индукціей OE . Съ увеличеніемъ $+i$ до Og , индукція достигаетъ первоначальной величины A . При повтореніи процесса размагничиванія и намагничиванія индукція измѣняется по кривымъ $ABCD$ и DEA .

Вышеизложенное показываетъ, что молекулы желѣза противятся перемагничиванію и на преодоленіе этого противодѣйствія приходится затрачивать нѣкоторую работу. Потеря работы на перемагничиваніе, согласно Steinmetz'a, отнесенная къ 1 куб. см.

дному періоду (измѣненіе силы тока отъ $-\dot{i}$ до $+\dot{i}$ и снова $\dot{i}$) пропорціональна 1.6 степени максимальной индукціи, т. е.

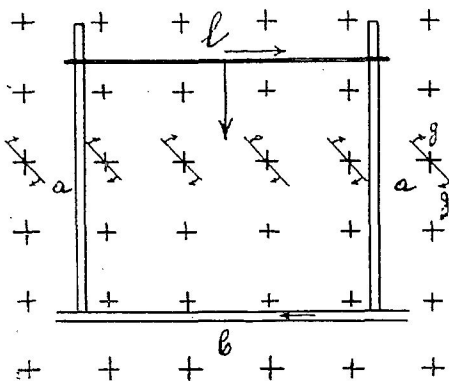
$$\frac{A}{Q} = \eta B_{\max}^{1.6} \text{ эргъ,}$$

гдѣ A — затрачиваемая на перемагничиваніе работа, Q — объемъ желѣза, η — коэффициентъ пропорціональности.

Въ динамо-машинахъ (черт. 17 и 18) желѣзо якоря A , вращающагося въ постоянномъ магнитномъ полѣ, подвергается перемагничиванію, хотя въ общемъ потери энергіи на перемагничиваніе въ динамо-машинахъ постоянного тока незначительны.

Электродвижущая сила индукціи.

Опытъ показываетъ, что въ проводникѣ, движущемся въ магнитномъ полѣ параллельно самому себѣ и перпендикулярно къ линиямъ силъ, возбуждается или, какъ говорятъ, наводится (индуцируется) электродвижущая сила. Если проводникъ l скользить, какъ показано на чертежѣ 20, по токопроводящимъ поло-



Черт. 20.

самъ aa , соединеннымъ между собою электрически полосой b , то, подъ влияніемъ наводимой въ проводникѣ l при его движеніи электродвижущей силы, въ контурѣ $laba$ появляется токъ. Направленіе электродвижущей силы въ проводникѣ l , а слѣдовательно, и тока въ упомянутомъ контурѣ, зависитъ отъ направленія линий силъ магнитнаго поля и движенія проводника l . На чертежѣ 20 линии силъ идутъ отъ

наблюдателя къ чертежу перпендикулярно къ плоскости послѣдняго (крестики отвѣчаютъ перьямъ стрѣлокъ, указывающихъ направленіе линий силъ). При движеніи проводника l по направленію къ полосѣ b въ контурѣ появляется токъ по направленію часовой стрѣлки.

Явленіе индукціи можно себѣ представить при помощи вышеприведенной механической модели слѣдующимъ образомъ. Для образованія магнитнаго поля съ направленіемъ силъ, указаннымъ

на чертежѣ 20, необходимо движеніе тока по нѣкоторому проводнику, охватывающему магнитное поле, въ направленіи часовой стрѣлки. При такомъ направленіи тока магнитное поле, представляющее напряженное состояніе среды, можетъ быть охарактеризовано напряженнымъ состояніемъ пружинъ, повернутыхъ на нѣкоторый уголъ противъ часовой стрѣлки (черт. 16 лѣвая половина, схематически *gg* на черт. 20). Проводникъ *l*, пересѣкая при своемъ движеніи линіи силъ, какъ бы освобождаетъ пружины изъ ихъ взведеннаго положенія, вслѣдствіе чего послѣднія поворачиваются по часовой стрѣлкѣ и при этомъ въ свою очередь возбуждаютъ въ проводникѣ *l*, согласно модели, представленной на черт. 16, электродвижущую силу, дѣйствующую слѣва на право (черт. 20). За промежутокъ времени dt , во время котораго проводникъ, двигаясь параллельно самому себѣ, перемѣщается на ds см., получается электрическая работа:

$$dA = E I dt,$$

гдѣ E наводимая въ контурѣ *la ba* электродвижущая сила, I — токъ въ контурѣ.

Упомянутая электрическая работа является результатомъ затраты соотвѣтствующей механической работы, расходуемой на перемѣщеніе въ магнитномъ полѣ проводника *l*, по которому проходитъ токъ I . Сила взаимодѣйствія f между полемъ и токомъ, согласно предыдущаго, выражается слѣдующимъ образомъ:

$$f = HIl,$$

гдѣ H — индукція въ воздухѣ.

При перемѣщеніи проводника *l* на величину ds затрачивается работа равная

$$f ds = HIl ds.$$

Такъ какъ упомянутыя электрическая и механическая работы равны другъ другу, то

$$dA = EI dt = HIl ds.$$

Откуда слѣдуетъ, что

$$E = Hl \frac{ds}{dt} = Hlv,$$

гдѣ v — скорость перемѣщенія проводника *l*.

Такъ какъ $l ds$ представляетъ собою поверхность, перпендикулярную къ направленію линій силъ, то произведеніе $Hl ds$ выражаетъ собою безконечное малое число линій dN , пересѣченное проводникомъ *l*.

Поэтому предыдущее выражение может быть представлено въ слѣдующемъ видѣ:

$$E = \frac{dN}{dt}$$

При движеніи проводника l происходитъ измѣненіе числа линій силъ, заключающихся въ контурѣ $la ba$, что даетъ основаніе для другого формулированія представленія объ электродвижущей силѣ индукціи, согласно котораго электродвижущая сила является результатомъ измѣненія числа линій силъ, охватываемыхъ контуромъ или рамкой.

Это представленіе вытекаетъ непосредственно также изъ вышеупомянутой механической модели. Всякій поворотъ на какой-либо уголъ пружинъ, характеризующихъ напряженное состояніе среды магнитнаго поля, отвѣчаетъ появленію или исчезновенію линій силъ и вызываетъ въ окружающемъ стержнѣ появленіе силы, соотвѣтствующей электродвижущей силѣ, наводимой въ проводникѣ, окружающемъ магнитное поле.

Изъ черт. 20 видно, что токъ, индуктированный въ контурѣ $la ba$ при уменьшеніи числа линій силъ, направляется по часовой стрѣлкѣ и, слѣдовательно, возбуждаетъ въ свою очередь линіи силъ, направляющіяся отъ наблюдателя въ плоскость чертежа, т. е. совпадающія съ направлениемъ существующихъ въ контурѣ линій силъ. При обратномъ движеніи проводника l линіи силъ будутъ возбуждаться противоположнаго направленія.

Такимъ образомъ, при уменьшеніи числа линій силъ, въ контурѣ возникаетъ токъ, стремящійся сохранить линіи силъ, при увеличеніи же въ контурѣ числа линіи возникаетъ токъ, стремящійся ослабить существующія въ контурѣ линіи силъ.

Отсюда вытекаетъ законъ *Lentz'a*, гласящій, что наводимый въ контурѣ, вслѣдствіе измѣненія числа линій силъ, токъ противодѣйствуетъ измѣненію числа линій силъ. Въ виду сего вышеприведенное выраженіе $E = \frac{dN}{dt}$ въ дѣйствительности имѣетъ видъ:

$$E = - \frac{dN}{dt} \text{ CGS} = - \frac{dN}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольтъ.}$$

Для опредѣленія направленія электродвижущей силы, наводимой въ контурѣ или рамкѣ, можетъ служить слѣдующее правило:

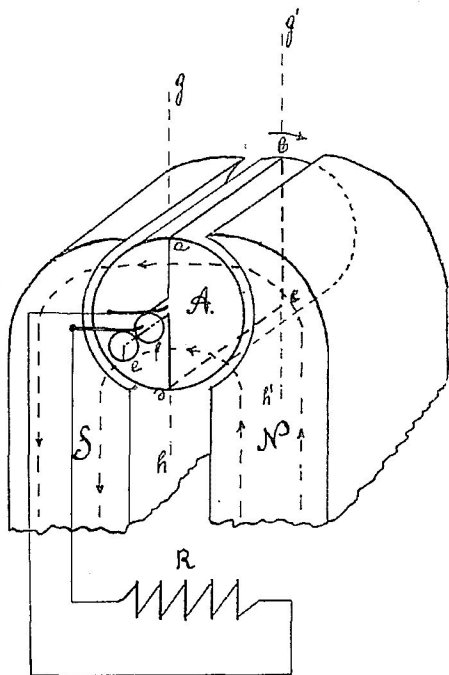
Если смотреть на рамку по направлению линий силъ, т. е. въ направленіи отъ сѣвернаго полюса къ южному, то, при уменьшеніи въ рамкѣ числа линий силъ, наводимая электродвижущая сила направлена по часовой стрѣлкѣ, при увеличеніи же числа линий силъ—обратно часовой стрѣлкѣ.

Возбужденіе электродвижущей силы въ якорѣ динамо-машины.

На явленіи индукціи основана работа динамо-машинъ. Необходимое для индукціи измѣненіе числа линий силъ въ рамкахъ, въ которыхъ должна наводиться электродвижущая сила, достигается путемъ вращенія этихъ рамокъ въ магнитномъ полѣ, возбуждаемомъ электромагнитами $B_1 B_2$ (черт. 17 и 18), при чемъ самыя рамки помѣщаются на сердечникѣ якоря A , который и вращается вмѣстѣ съ рамками.

Разсмотримъ сначала вращеніе одиночной рамки $abcd$ (черт. 21), концы которой соединены съ контактными кольцами, e, f . По кольцамъ скользятъ контактные щетки, соединенныя съ внѣшнею цѣпью, сопротивление коей равно R .

Въ положеніи рамки, показанномъ на чертежѣ, т. е. при совпаденіи съ нейтральною ¹⁾ осью gh , черезъ рамку проходитъ наибольшее число линий силъ N . При вращеніи рамки и выходѣ ея изъ упомянутого положенія число линий, проходящее черезъ рамку, будетъ уменьшаться и обратится въ 0, когда рамка станетъ въ положеніе перпендикулярное нейтральной оси. При дальнѣй-



Черт. 21.

шемъ вращеніи рамки линии силъ, войдя въ рамку съ противоположной стороны, будутъ увеличиваться до величины N (рамка

¹⁾ Ось, перпендикулярная направленію линий силъ магнитнаго потока, проходящаго черезъ сердечникъ якоря.

повернулась на 180° отъ исходнаго положенія) и затѣмъ снова уменьшаться до 0 (уголъ поворота 270°) съ тѣмъ, чтобы, снова переѣннвъ направленіе входа въ рамку, увеличиваться до величины N (первоначальное положеніе рамки, уголъ поворота 360°).

Число линій силъ N' , проходящее черезъ рамку въ любой моментъ, пропорціонально проекціи площади рамки на нейтральную плоскость ($gh\ g'h'$), т. е. $\square abcd \times \cos \alpha$, гдѣ α уголъ образуемой плоскостью рамки съ нейтральной осью (gh). А такъ какъ произведеніе площади рамки на индукціи равно N , то $N' = N \cos \alpha$.

Такъ какъ во все время вращенія рамки измѣняется число линій силъ, охватываемое рамкой, то въ рамкѣ возбуждается электродвижущая сила, согласно формулы $E = - \frac{dN'}{dt}$, при чемъ

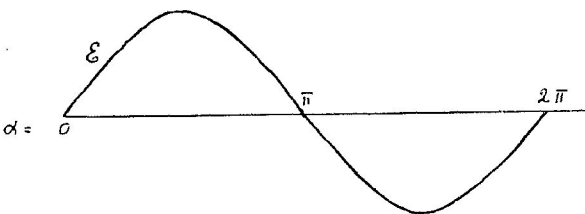
электродвижущая сила является величиной переменнѣй въ зависимости отъ переменнѣй скорости измѣненія числа линій силъ въ рамкѣ. Подставляя въ вышеприведенную формулу $N' = N \cos \alpha$

и принимая во вниманіе, что $\alpha = \frac{2\pi}{T} \cdot t$ (векторъ, равный единицѣ, время одного оборота коего T , движется съ угловой скоростью $\frac{2\pi}{T}$

и, слѣдовательно, за время t описываетъ дугу $= \frac{2\pi}{T} \cdot t$), получимъ

$$E = - \frac{dN'}{dt} = N \sin \alpha \frac{d\alpha}{dt} = \frac{2\pi}{T} N \sin \alpha.$$

Путемъ откладыванія по оси абсциссъ величинъ α , а по оси ординатъ соотвѣтственныхъ величинъ E , получается кривая измѣненія электродвижущей силы (черт. 22), наводимой въ рамкѣ,



Черт. 22.

при чемъ время, въ теченіе котораго α измѣняется отъ 0 до 2π , представляется временемъ одного періода и въ двух-полюсной машинѣ совпадаетъ съ вре-

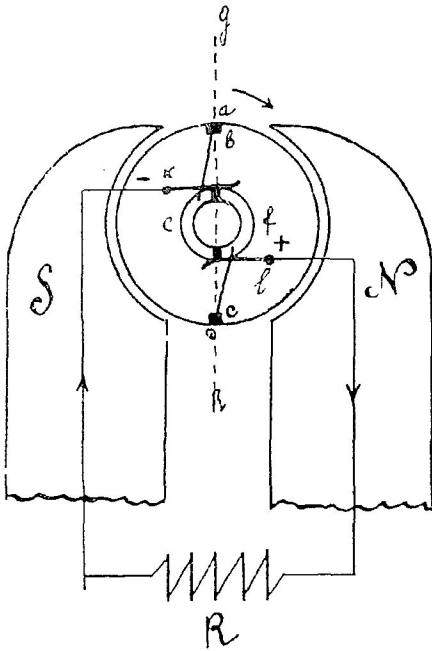
менемъ одного полного оборота якоря. Если внѣшняя цѣпь черезъ щетки e' замкнута на сопротивление R , то подъ вліяніемъ возбуждаемой въ рамкѣ электродвижущей силы появится въ цѣпи, составляемой рамкой, соединительными проводами и сопротивленіемъ R , токъ, кривая измѣненія котораго будетъ подобна кривой измѣненія электродвижущей силы. Изъ черт. 22 видно, что элек-

тродвигущая сила и токъ за время одного періода мѣняють направление. Дѣйствительно, если прослѣдить направление электродвигущей силы въ рамкѣ при различныхъ положеніяхъ послѣдней, смотря на рамку по направленію линіи силъ отъ N къ S (черт. 21), то окажется: въ моментъ прохожденія рамки черезъ нейтральную ось, такъ какъ число линій силъ, проходящихъ черезъ рамку, при движеніи послѣдней въ районѣ нейтральной оси практически почти не измѣняется, то электродвигущая сила равна $O, \alpha = 0$. Въ слѣдующее мгновеніе число линій въ рамкѣ начинаетъ уменьшаться и поэтому появляется электродвигущая сила, направленная по часовой стрѣлкѣ, т. е. въ направленіи $abcd$. Когда рамка повернется на 90° , линіи силъ исчезнутъ изъ контура рамки (наибольшая скорость измѣненія числа линій силъ и поэтому $E = E_{max}$) и въ слѣдующее мгновеніе, благодаря дальнѣйшему повороту рамки, линіи силъ начнутъ входить въ рамку съ противоположной стороны. Такъ какъ число линій силъ въ рамкѣ начинаетъ увеличиваться, то направление электродвигущей силы получается обратное часовой стрѣлкѣ, но такъ какъ рамка теперь обращена къ наблюдателю противоположной стороной, то направление электродвигущей силы составляетъ $abcd$, т. е. прежнее. Въ виду замедленія скорости измѣненія числа линій силъ, E по величинѣ убываетъ и достигаетъ O , когда рамка доходитъ до нейтральнаго положенія, при чемъ ребро ab теперь внизу, dc —верху ($\alpha = 180$, $N = N_{max}$). Въ слѣдующій моментъ число линій силъ начинаетъ уменьшаться и вслѣдствіе сего электродвигущая сила въ рамкѣ получаетъ направление по часовой стрѣлкѣ, т. е. $dcba$. При переходѣ рамки черезъ положеніе, отвѣчающее $\alpha = 270^\circ$, одновременно измѣняется направление входа линій силъ въ рамку и, вмѣсто возрастанія линій силъ, начинается ихъ убываніе. Въ результатѣ направленіе электродвигущей силы въ рамкѣ сохраняется $dcba$, величина же ея уменьшается до O , когда рамка, совершивъ полный оборотъ, приходитъ въ нейтральную плоскость и, въ то же время, въ исходное положеніе.

Такимъ образомъ, благодаря характеру возбуждаемой въ рамкѣ электродвигущей силы и способу коммутірованія, т. е. полученіе тока изъ рамки черезъ кольца и щетки, въ цѣпи получается переменный токъ.

Если вмѣсто двухъ колець устроить одно контактное кольцо, носящее названіе коллектора или коммутатора и состоящее для разсматриваемаго случая изъ двухъ половинъ, изолированныхъ другъ отъ друга, и къ этимъ половинамъ присоединить концы

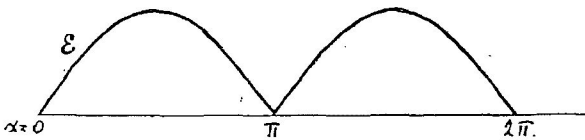
рамки; а щетки расположить по нейтральной оси gh (черт. 23), то характер электродвижущей силы въ рамкѣ сохраняется, но мѣняются условія коммутаци и во внѣшней цѣпи получается спрямленный пульсирующий токъ, согласно черт. 24.



Черт. 23.

снова отъ щетки l черезъ сопротивленіе R къ щеткѣ k , т. е. во внѣшней цѣпи получается токъ одного и того же направленія или токъ постоянный.

Кривая этого тока (черт. 24) показываетъ, что токъ по времени измѣняется по своей силѣ, т. е. токъ пульсирующий.



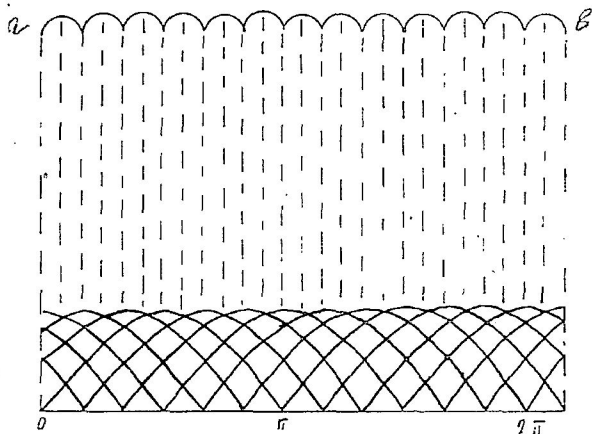
Черт. 24.

Для полученія тока не только постоянного по своему направленію во внѣшней цѣпи, но постоянного и по своей

силѣ, необходимо на якорѣ располагать большое количество рамокъ, размѣщаемыхъ по периферіи якоря равномерно и соединяемыхъ между собою послѣдовательно такимъ образомъ, что рамки представляютъ собою замкнутую на себя обмотку якоря. Число пластинъ коллектора также увеличивается соотвѣтственно съ числомъ рамокъ, при чемъ одна рамка можетъ состоять и изъ

нѣсколькихъ витковъ. Пластины коллектора приключаются къ соединительнымъ между рамками проводамъ.

При такомъ устройствѣ электродвижущія силы отдѣльныхъ, послѣдовательно включенныхъ рамокъ, суммируются и, кромѣ того, суммарная электродвижущая сила или напряжение между каждыми двумя діаметральными пластинами коллектора въ моментъ прохода ими какой-либо оси, напримѣръ, нейтральной gh , достигаетъ одной и той же величины. На черт. 25 нанесены кривыя электродвижущихъ силъ отдѣльныхъ рамокъ, отстающія по времени другъ отъ друга на уголъ, отвѣчающій дугѣ окружности якоря между проводами смежныхъ рамокъ. Путемъ суммированія этихъ электродвижущихъ силъ въ разные моменты вращенія якоря получается кривая ab



Черт. 25.

(черт. 25) напряжения у борновъ динамо-машины. Чѣмъ больше рамокъ на якорѣ, тѣмъ болѣе выравнивается кривая ab , а слѣдовательно, тѣмъ постояннѣе напряжение у борновъ.

Типы якорей.

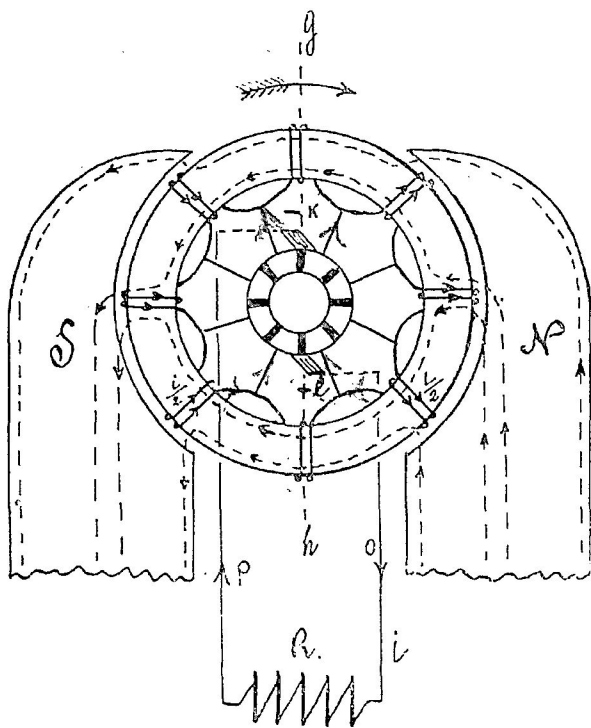
Якори динамо-машины въ зависимости отъ устройства желѣзныхъ сердечниковъ и способа ихъ обмотки раздѣляются на два типа, а именно, кольцевой и барабанный.

Первый типъ, носящій по имени изобрѣтателя названіе кольца Грамма, представляетъ собою пустотѣлый желѣзный цилиндръ, вокругъ котораго спирально навита замкнутая на себя обмотка якоря, состоящая изъ мѣдной изолированной проволоки (черт. 26). Промежуточные соединенія между отдѣльными рамками или секціями обмотки приключены къ пластинамъ коллектора. Магнитный потокъ, выйдя изъ полюснаго наконечника сѣвернаго полюса, раздвѣивается, такъ какъ, выбирая путь наименьшаго сопротивленія, направляется по верхнему и нижнему полуци-

линдрамъ желѣзнаго сердечника и затѣмъ, соединившись въ одинъ потокъ, входитъ въ южный полюсный наконечникъ. Такимъ образомъ, отдѣльныя рамки или секціи обмотки, проходя черезъ нейтральную ось gh , охватываютъ наибольшее число линий силъ, равное половинѣ магнитнаго потока $\left(\frac{N}{2}\right)$, выходящаго изъ полюсного наконечника. Изъ чертежа 26 усматривается, что число отдѣльныхъ витковъ обмотки равно числу отдѣльныхъ

проводовъ, расположенныхъ на наружной цилиндрической поверхности якоря.

Направление электродвижущихъ силъ, возбуждаемыхъ въ отдѣльныхъ рамкахъ обмотки, опредѣляется, согласно вышеупомянутому правилу и показано на черт. 26 стрѣлками. Электродвижущія силы, въ послѣдовательно включенныхъ рамкахъ направленные въ одну и ту же сторону, суммируются. Въ двуполусной динамо-машинѣ, какъ это усматривается изъ черт. 26, обмотка



Черт. 26.

якоря въ отношеніи направленія возбуждающихся въ ней электродвижущихъ силъ дѣлится нейтральною осью gh , перпендикулярной направленію силъ, на двѣ половины. Суммарная электродвижущая сила, дѣйствующая въ одной половинѣ обмотки, равна и прямо противоположна электродвижущей силѣ второй половины обмотки. Такимъ образомъ, обѣ электродвижущія силы взаимно уравниваются и поэтому тока въ обмоткѣ якоря не будетъ. Если же на коллекторъ по нейтральной оси, наложить двѣ щетки k и l и къ нимъ приключить цѣпь съ какимъ либо сопротивленіемъ R , то, такъ какъ между щетками k и l дѣйствуетъ

напряжѣніе, равное суммарной электродвижущей силѣ половины обмотки якоря, во внѣшней цѣпи установится токъ i , который, выйдя изъ щетки l и пройдя черезъ сопротивление R , направится въ щетку k . Далѣе токъ i раздвѣивается, и по каждой половинѣ обмотки проходитъ токъ $\frac{i}{2}$, въ щеткѣ же l оба тока снова соединяются и во внѣшнюю цѣпь направляется токъ i .

Сила тока i въ цѣпи, образуемой двумя половинами обмотки якоря и внѣшнимъ сопротивленіемъ R , включая сюда и сопротивление соединительныхъ проводовъ r_0 , опредѣляется согласно закона Ома: $i = \frac{E}{R_0}$, гдѣ E дѣйствующее въ цѣпи напряженіе, т. е. въ данномъ случаѣ напряженіе, возбуждаемое въ каждой изъ половинъ обмотки якоря, а R_0 — полное сопротивление цѣпи, слагающееся изъ сопротивленія R внѣшней цѣпи и сопротивленія обмотки якоря между щетками k и l . Щетки k и l дѣлятъ сопротивление обмотки якоря на двѣ равныя части, которыя по отношенію рассматриваемой цѣпи включены параллельно другъ другу. Общее сопротивление обѣихъ половинъ обмотки якоря при такомъ включеніи опредѣляется на основаніи 1 закона Кирхгофа:

$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$, гдѣ r_1 — сопротивление одной половины, r_2 — сопротивление второй половины. Если обозначить черезъ r_0 — сопротивление одного витка, а черезъ n — число проводовъ на окружности якоря, равное числу витковъ обмотки якоря, то сопротивление каждой изъ половинъ названной обмотки равняется $r_0 \cdot \frac{n}{2}$. Слѣдовательно,

$$r = \frac{r_0^2 \cdot \frac{n^2}{4}}{2 r_0 \cdot \frac{n}{2}} = \frac{r_0 n}{4},$$

а сила тока въ вышеупомянутой цѣпи

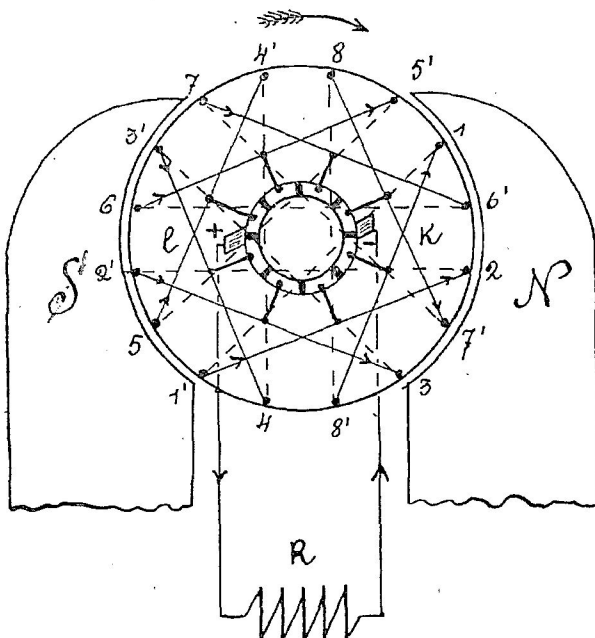
$$i = \frac{E}{\frac{r_0 n}{4} + R}.$$

Слѣдуетъ отмѣтить, что благодаря вышеуказанному направленію магнитнаго потока въ сердечникѣ кольцевого якоря (черт. 26), ребра витковъ обмотки, расположенные на внутренней цилиндрической поверхности якоря, линій силъ не пересѣкаютъ и по этому непосредственно въ нихъ электродвижущая сила не возбуждается.

Якорь барабаннаго типа состоитъ изъ сплошнаго желѣзнаго цилиндра, а обмотка располагается на наружной его поверхности такъ, что каждыя два діаметрально противоположные провода составляютъ одинъ витокъ, при чемъ начало витка соединяется съ концомъ предыдущаго витка, а конецъ витка съ началомъ слѣдующаго витка.

Число витковъ на якорѣ барабаннаго типа, такимъ образомъ, равняется половинному количеству проводовъ, расположенныхъ на наружной цилиндрической поверхности якоря.

Примѣръ обмотки двуполуснаго якоря барабаннаго типа показанъ на черт. 27. Соединительные провода, расположенные



Черт. 27.

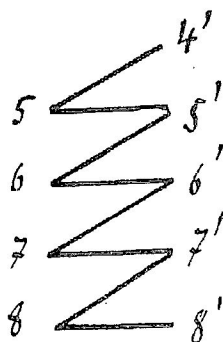
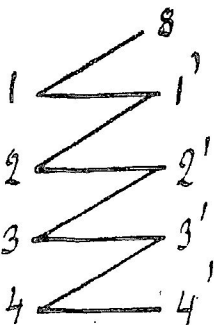
на боковой поверхности цилиндра, обращенной къ наблюдателю, показаны сплошными линиями, а расположенные на задней боковой поверхности — прерывистыми. Соединеніе между отдѣльными секціями обмотки приключены къ соотвѣтствующимъ пластинамъ коллектора. Въ разсматриваемомъ случаѣ каждая секція состоитъ изъ одного витка.

Слѣдующая схема поясняетъ устройство обмотки, при

чемъ наклонныя линіи отвѣчаютъ соединеніямъ на передней боковой поверхности, а горизонтальныя линіи — соединеніямъ на задней боковой поверхности якоря.

Направленіе электродвижущихъ силъ, возбуждаемыхъ въ отдѣльныхъ виткахъ обмотки въ моментъ нахожденія якоря въ указанномъ на черт. 27 положеніи, опредѣляется при помощи вышеприведеннаго правила и показано стрѣлками на соединеніяхъ передней боковой поверхности якоря. Изъ чертежа 27 усматривается, что электродвижущія силы, возбуждаемая въ отдѣльныхъ виткахъ, суммируются за исключеніемъ витковъ, образуемыхъ про-

водами 44' и 88', въ которыхъ электродвижушія силы направлены въ противоположныя стороны. Поэтому, если щетки l и k иомѣстѣ такъ, чтобы въ разсматриваемый моментъ онѣ касались пластинъ коллектора, находящихся въ непосредственномъ соединеніи съ витками 44' и 88', то, при замкнутой внѣшней цѣпи, токъ изъ обмотки якоря черезъ щетку l направится во внѣшнюю цѣпь и возвратится въ обмотку якоря черезъ щетку k . Щетки k и l дѣлятъ обмотку, какъ



и въ кольцевомъ якорѣ, на двѣ равныя части, въ которыхъ возбуждаются равныя и взаимно противоположныя электродвижушія силы E . Въ моментъ, изображенный на черт. 27, въ одну половину обмотки включены послѣдовательно провода 7', 7, 6', 6, 5', 5, а въ другую — провода 1, 1', 2, 2', 3, 3'. Витокъ, состоящій изъ проводовъ 88', замкнутъ на корсткую щеткой k , а витокъ 44' щеткой l , такъ какъ обѣ щетки въ этотъ моментъ перекрываютъ по двѣ пластины коллектора. Въ слѣдующій моментъ, когда каждая щетка будетъ касаться только одной пластины, въ первой половинѣ обмотки будутъ послѣдовательно включены провода 7', 7, 6', 6, 5', 5, 4', 4, а во второй 8, 8', 1, 1', 2, 2', 3, 3'. Сопротивленіе обмотки якоря по отношенію къ внѣшней цѣпи, благодаря параллельному включенію обѣихъ половинъ обмотки, равно половинѣ сопротивленія каждой изъ половинъ обмотки якоря. Если обозначить черезъ n —число проводовъ на окружности якоря, то число витковъ равно $\frac{n}{2}$. Обозначимъ черезъ r_0 —сопротивленіе одного витка, включая сюда и соотвѣтствующіе соединительные провода. Отсюда сопротивленіе половины обмотки равно $\frac{n}{2} \cdot r_0 \cdot \frac{1}{2}$, а общее сопротивленіе обмотки якоря по отношенію къ внѣшней цѣпи $\frac{r_0 n}{8}$.

Общее сопротивленіе вмѣстѣ съ сопротивленіемъ внѣшней цѣпи

$$\frac{r_0 n}{8} + R,$$

а сила тока въ цѣпи

$$i = \frac{E}{\frac{r_0 n}{8} + R}.$$

Электродвижущая сила динамо-машины.

Электродвижущая сила динамо-машины представляет собой въ каждый данный моментъ вращенія якоря сумму электродвижущихъ силъ, которыя возбуждаются въ тотъ же моментъ въ отдѣльныхъ виткахъ, включенныхъ послѣдовательно между упомянутыми щетками

$$E = \sum e.$$

Такъ какъ электродвижущая сила въ отдѣльномъ виткѣ измѣняется, какъ выше было выведено, согласно выраженія $e = \frac{2\pi}{T} N \sin \alpha$, то вмѣсто суммированія мгновенныхъ значеній e въ отдѣльныхъ виткахъ, можно опредѣлить E путемъ умноженія числа послѣдовательно включенныхъ витковъ на среднія значенія e за время, въ теченіе котораго e отъ 0 достигаетъ своего максимальнаго значенія и снова уменьшается до 0, т. е. за время полуперіода, во время котораго α въ свою очередь измѣняется отъ 0 до π .

Сумма e за полуперіодъ выражается интеграломъ

$$\int_0^{\pi} \frac{2\pi}{T} N \sin \alpha \, d\alpha = -\frac{2\pi}{T} N \left[\cos \alpha \right]_0^{\pi} = \frac{4\pi}{T} N$$

и изображается площадью, ограниченной синусоидой (черт. 24), съ основаніемъ π .

Эта площадь равновелика площади прямоугольника, также съ основаніемъ π и высотой, равною e_m , т. е. среднему значенію e .

Слѣдовательно,

$$e_m \pi = \frac{4\pi}{T} N$$

$$e_m = \frac{4}{T} N.$$

T представляетъ собою время одного періода, которое въ двуполюсной машины равно времени одного оборота витка, а,

слѣдовательно, и якоря. Такимъ образомъ $\frac{1}{T}$ есть число оборотовъ якоря въ одну секунду, которое обозначимъ черезъ k .

$$e_m = 4 k N.$$

Если n представляетъ собою число проводовъ на наружной цилиндрической поверхности якоря, то число витковъ включенныхъ послѣдовательно между щетками, равно въ якорѣ кольцевого типа $\frac{n}{2}$, а въ якорѣ барабаннаго типа $\frac{n}{4}$.

Магнитный токъ, который охватывается виткомъ при его прохожденіи черезъ нейтральную ось, въ якорѣ кольцевого типа равняется $\frac{N}{2}$, въ якорѣ барабаннаго типа N . Такимъ образомъ, электродвижущая сила E двуполусной динамо-машины въ первомъ случаѣ равна

$$E = 4 k \cdot \frac{N}{2} \cdot \frac{n}{2} = n \cdot k \cdot N \text{ (CGS)},$$

а во второмъ

$$E = 4 k \cdot N \cdot \frac{n}{4} = n \cdot k \cdot N \text{ (CGS)},$$

т. е. и въ томъ и въ другомъ случаѣ E зависитъ отъ числа проводовъ, расположенныхъ на наружной цилиндрической поверхности якоря, отъ величины магнитнаго потока, пересѣкаемаго этими проводами, и скорости, съ которою происходитъ упомянутое пересѣченіе.

Электродвижущая сила двуполусной динамо-машины, выраженная въ вольтахъ, такъ какъ 1 вольтъ $= 10^8$ CGS, представляется въ слѣдующемъ видѣ

$$E = n \cdot k \cdot N \cdot 10^{-8} \text{ вольтъ.}$$

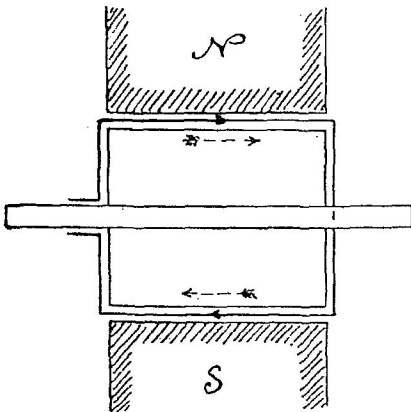
Динамо-машины большихъ мощностей, вслѣдствіе необходимости приданія ихъ якорямъ большихъ размѣровъ для надлежащаго излученія развивающагося въ якорной обмоткѣ тепла, и вытекающихъ отсюда конструктивныхъ соображеній въ отношеніи электромагнитовъ, строятся многополюсными, при чемъ обмотка якоря дѣлится соотвѣтствующимъ количествомъ щетокъ на число параллельныхъ цѣпей, равное числу полюсовъ.

Токи Фуко.

Подъ токами Фуко разумѣются вихревые токи, которые идутъ не по линейному пути, а замыкаются тамъ, гдѣ встрѣчаютъ наименьшее сопротивленіе.

Они появляются на толстых проводниках или металлических массах, когда тѣ или другія пересекаютъ линіи силъ. Направленіе токовъ Фуко въ мѣстахъ пересѣченія линій силъ перпендикулярно направленію линій силъ и направленію движенія проводника или массы.

Если бы сердечникъ якоря динамо-машины состоялъ изъ массивнаго желѣзнаго цилиндра, то въ немъ развивались бы токи Фуко очень большой силы, которые вызывали бы сильное нагрѣваніе якоря и, слѣдовательно, потерю работы. На черт. 28 въ разрѣзѣ показанъ якорь динамо-машины. Въ тотъ моментъ, когда



Черт. 28.

рамка обмотки якоря проходитъ мимо полюсовъ, въ ней возбуждается электродвижущая сила, направленіе которой показано стрѣлкой. Въ томъ же направленіи, однако, возбуждаются и электродвижущія силы и въ желѣзѣ якоря въ частяхъ, сосѣднихъ съ рамкой (пунктирная стрѣлка). Такъ какъ сопротивленіе массивнаго сердечника очень незначительно, то подѣйствіемъ вышеупомянутыхъ электродвижущихъ силъ должны появиться токи большой силы.

Во избѣжаніе появленія токовъ Фуко, сердечники якорей изготовляются не изъ сплошныхъ желѣзныхъ цилиндровъ, а изъ листового желѣза, изъ котораго для кольцевого якоря штампуются кольца, а для барабаннаго—диски. Между тѣми и другими прокладывается бумажная изоляція и въ такомъ видѣ кольца и диски спрессовываются особыми сжимами, вдоль вала, на которомъ вращается якорь.

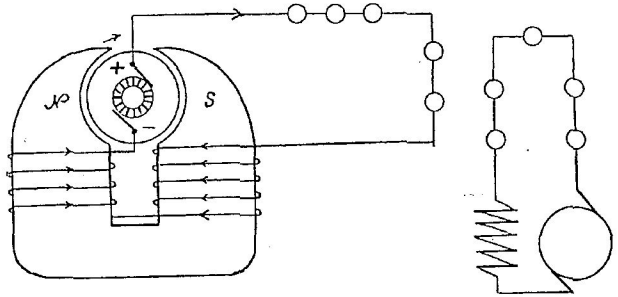
Возбужденіе динамо-машинъ.

Въ электрическихъ машинахъ первоначальнаго типа магнитное поле, необходимое для возбужденія въ обмоткѣ якоря электродвижущей силы, получалось при помощи постоянныхъ стальныхъ магнитовъ. Затѣмъ стали примѣнять для той же цѣли электромагниты, обмотка которыхъ питалась отъ посторонняго источника тока. Наконецъ, когда въ концѣ семидесятыхъ годовъ прошлаго столѣтія было доказано, что остаточный магнетизмъ въ

желѣзѣ можетъ быть использованъ для самовозбужденія электрическихъ машинъ, появился современный типъ динамо-машинъ, въ которыхъ обмотка электромагнитовъ питается токомъ, вырабатываемымъ въ обмоткѣ якоря.

При пускѣ въ ходъ динамо-машины, якорь вращается въ магнитномъ полѣ небольшой силы, вызываемомъ остаточнымъ магнетизмомъ желѣзныхъ сердечниковъ электромагнитовъ. Вслѣдствіе вращенія оботки якоря въ магнитомъ полѣ, въ упомянутой обмоткѣ возбуждается

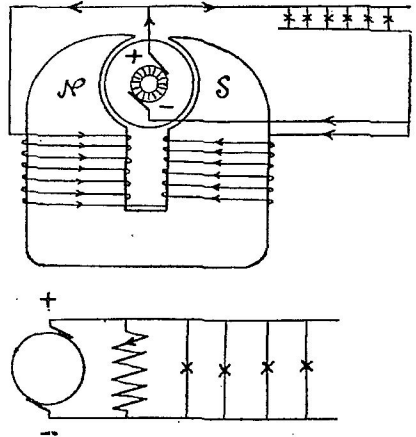
электродвижущая сила, хотя и очень слабая. Результатомъ послѣдней является слабый токъ, поступающій въ обмотку электромагнитовъ и усиливающий тѣмъ магнитный потокъ въ сер-



Черт. 29.

дечникахъ электромагнитовъ, въ частности, и въ магнитной цѣпи динамо-машины вообще. Электродвижущая сила въ обмоткѣ якоря возрастаетъ и увеличивается магнетизирующій токъ въ электромагнитахъ. Указанный процессъ продолжаетъ развиваться далѣе въ той же послѣдовательности до уравненія электродвижущей силы, возбуждаемой въ обмоткѣ якоря, съ ея расходомъ, т. е. съ произведеніемъ соотвѣтствующей силы тока въ цѣпи на сопротивление цѣпи.

Въ зависимости отъ способа включенія обмотки электромагнитовъ, динамо-машины дѣлятся на динамо-машины: 1) съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ (серіесъ-машины), 2) съ параллельнымъ возбужденіемъ (шунтъ-машины) и 3) съ послѣдовательной и параллельной обмотками (компаундъ-машины).



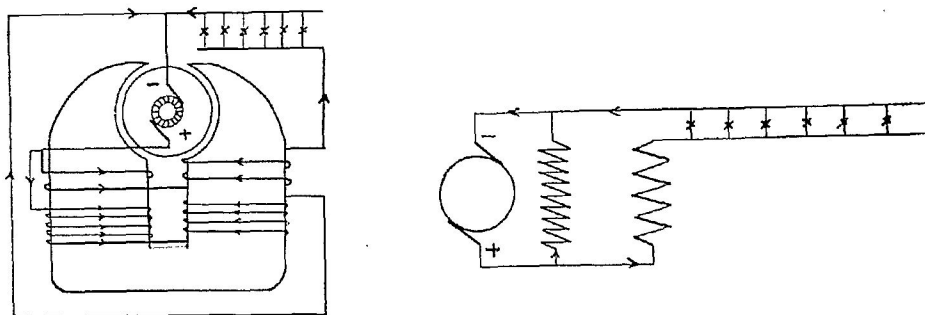
Черт. 30.

У динамо-машинъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ обмотка электромагнитовъ состоитъ изъ небольшого числа витковъ изъ толстой проволоки, слѣдовательно, малаго сопротивленія, и

эта обмотка включена послѣдовательно съ сопротивленіемъ внѣшней цѣпи (черт. 29).

У динамо-машинъ съ параллельнымъ возбужденіемъ обмотка электромагнитовъ состоитъ изъ большого числа оборотовъ тонкой проволоки и присоединена непосредственно къ щеткамъ (борнамъ) динамо-машины, т. е. включена параллельно внѣшней цѣпи (черт. 30). Вслѣдствіе большого сопротивленія обмотки электромагнитовъ, магнетизирующий токъ въ этой обмоткѣ очень малъ по сравненію съ токомъ во внѣшней цѣпи.

Компаундъ-машина представляетъ собою по существу динамо-машину съ параллельнымъ возбужденіемъ, магнитное поле которой усиливается дѣйствіемъ нѣсколькихъ витковъ толстой проволоки, включенныхъ послѣдовательно по отношенію къ внѣшней цѣпи (черт. 31). Цѣль такой обмотки поддерживать у борновъ ма-



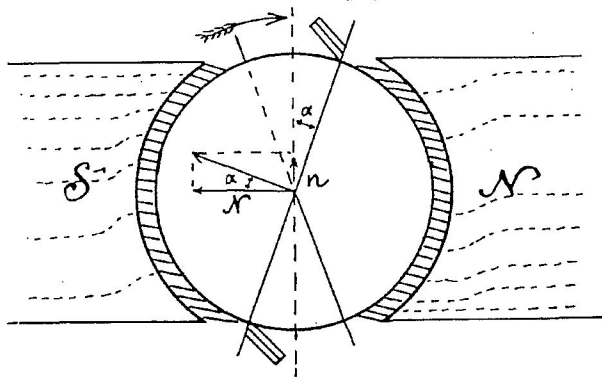
Черт. 31.

шины (зажимовъ, къ которымъ приключается внѣшняя цѣпь) постоянно напряженія при увеличеніи потребленія тока, несмотря на увеличивающееся при этомъ паденіе напряженія въ обмоткѣ якоря.

Реакція якоря.

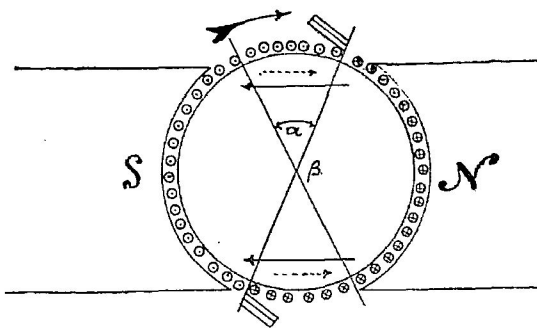
Когда динамо-машина работаетъ подъ нагрузкой, т. е. ея внѣшняя цѣпь замкнута на какое-либо сопротивление R , то токъ въ проводахъ обмотки якоря, расположенныхъ на наружной цилиндрической поверхности якоря, направленъ: въ проводахъ, проходящихъ мимо одного изъ полюсовъ, въ одну сторону, а проходящихъ мимо другого полюса, въ противоположную сторону. Такъ, при направленіи вращенія якорей, показанномъ на черт. 26—27, въ проводахъ противъ сѣвернаго полюса токъ идетъ по направленію отъ наблюдателя, а въ проводахъ противъ южнаго полюса къ наблюда-

телю. Такое направление токовъ въ обмоткѣ якоря аналогично направлению тока въ виткахъ соленоида и вызываетъ намагничиваніе сердечника якоря по направлению нейтральной оси, при чемъ это намагничиваніе тѣмъ больше, чѣмъ больше нагрузка динамо-машины, т. е. чѣмъ больше токъ во внѣшней цѣпи. Линіи силъ образующагося такимъ образомъ поперечнаго магнитнаго поля, суммируясь съ основнымъ магнитнымъ потокомъ, вызываютъ искривленіе направленія послѣдняго (черт. 32), вслѣдствіе чего линіи въ сердечникѣ якоря образуютъ нѣкоторый уголъ α съ первоначальнымъ своимъ направленіемъ. На этотъ же уголъ перемѣщается и нейтральная ось, къ которой сходятся и отъ которой расходятся токи въ соответствующихъ частяхъ обмотки якоря. Сообразно съ перемѣщеніемъ нейтральной оси представляется необходимымъ передвинуть и щетки, такъ какъ въ противномъ случаѣ токъ въ части витковъ будетъ проходить навстрѣчу электро-



Черт. 32.

движущей силѣ, возбуждаемой въ этихъ виткахъ. Кромѣ того, для хорошей коммутациіи необходимо, чтобы замыканіе витковъ обмотки якоря на короткую въ моментъ перекрѣтій щетками двухъ смежныхъ пластинъ коллектора происходило въ такомъ положеніи витковъ, въ которомъ они пересекаютъ въ единицу времени наименьшее число линій силъ, что и имѣетъ мѣсто при прохожденіи ихъ черезъ нейтральную ось.



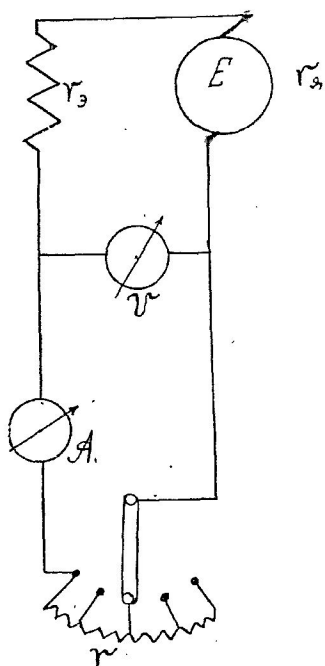
Черт. 33.

На черт. 33 показано примѣрное расположеніе щетокъ при работѣ динамо-машины подъ нагрузкой. Направленіе тока въ проводахъ обмотки якоря показано: точками—направленіе къ наблюдателю, крестиками—направленіе отъ наблюдателя. При указан-

номъ положеніи щетокъ вся обмотка якоря разбивается на двѣ части, а именно, на расположенную внутри угла α нейтральной зоны, а на расположенную внутри угла β , опирающагося на дугу полюсныхъ наконечниковъ. Витки, находящіеся въ полосѣ нейтральной зоны, вызываютъ магнитное поле противоположнаго направленія основному магнитному потоку, и поэтому вызываютъ ослабленіе послѣдняго. Дѣйствіе этихъ витковъ и называется реакціей якоря. При расчетѣ амперъ-ватковъ обмотки электромагнитовъ необходимо число амперъ-витковъ, потребное для преодоленія магнитнаго сопротивленія сердечника якоря, воздушныхъ полюсныхъ промежутковъ и сердечниковъ электромагнитовъ, увеличить на нѣкоторое (отъ 10 до 15% отъ основного) число амперъ-витковъ, имѣющее цѣлью уравновѣсить дѣйствіе реакціи якоря.

Динамо-машина съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ при переменнѣй нагрузкѣ.

Динамо-машины, работающія какъ генераторы, приводятся во вращеніе съ постоянною скоростью при различныхъ нагрузкахъ. На черт. 34 схематически показана динамо-машина съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ, сопротивление обмотки якоря которой r_a , сопротивление обмотки электромагнитовъ r_e , и регулируемое сопротивление вѣншей цѣпи r . Между борнами динамо-машины включенъ вольтметръ V —приборъ, измѣряющій напряженіе, въ данномъ случаѣ напряженіе между борнами, а послѣдовательно во вѣншую цѣпь включенъ амперметръ A , измѣряющій силу тока.



Черт. 34.

Если вѣншее сопротивление измѣнять отъ бесконечно большой величины (вѣншая цѣпь разомкнута) до нуля, (вѣншая цѣпь замкнута на короткую), то соотвѣтственно сила тока i въ цѣпи отъ 0 будетъ возрастать до нѣкоторой величины i_m . При этомъ будетъ измѣняться также и напряженіе e у борновъ. Откладывая по оси абсциссъ различныя значенія тока i , а по оси ординатъ соотвѣтствующія имъ, согласно показанія

приборовъ, значенія напряженія у борновъ e , и соединяя вершины ординатъ, получимъ кривую e (черт. 35), дающую зависимость напряженія у борновъ динамо-машины отъ силы тока во внѣшней иѣпи. Проведемъ прямую подъ угломъ α къ оси абсциссъ при условіи, чтобы

$$\operatorname{tg} \alpha = r_n + r_s = \frac{E'}{i}.$$

E' представляетъ собою ту часть электродвижущей силы, возбуждаемой въ обмоткѣ якоря, которая идетъ на преодоленіе сопротивленія обмотокъ якоря и электромагнитовъ.

Вышеупомянутая прямая, такимъ образомъ, даетъ зависимость

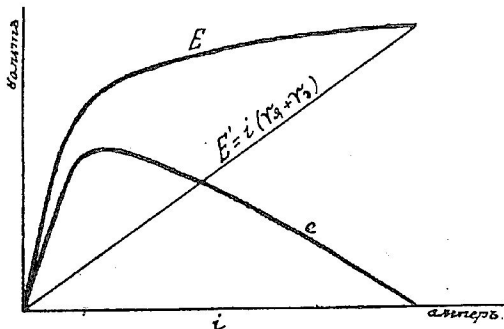
$$E' = i (r_n + r_s)$$

отъ силы тока i .

Путемъ суммированія ординатъ кривой e съ ординатами E' получается кривая E , представляющая собою измѣненіе электродвижущей силы, возбуждаемой въ обмоткѣ якоря, въ зависимости отъ силы тока во внѣшней цѣпи и называемая характеристикой серіесъ-динамо-машины. При разомкнутой цѣпи, такъ какъ сила тока въ обмоткахъ электромагнитовъ равна 0 и поэтому магнитный потокъ почти равенъ 0 (остаточный магнетизмъ), то и электродвижущая сила въ обмоткѣ якоря также практически равна 0. Если цѣпь замкнуть на не очень большое сопротивленіе, то въ цѣпи устанавливается токъ, обусловливающий появленіе соответствующей силы магнитнаго поля, а, слѣдовательно, и электродвижущей силы въ обмоткѣ якоря. При дальнѣйшемъ уменьшеніи сопротивленія во внѣшней цѣпи увеличивается сила тока и возрастаетъ электродвижущая сила. Возрастаніе послѣдней по мѣрѣ увеличенія тока замедляется, съ одной стороны вслѣдствіе магнитнаго насыщенія сердечниковъ электромагнитовъ, съ другой, благодаря увеличенію реакціи якоря.

Напряженіе e у борновъ, являющееся разностью между электродвижущей силой, возбуждаемой въ обмоткѣ якоря, и ея частью, идущей на преодоленіе сопротивленія обмотокъ якоря и электромагнитовъ, т. е.

$$e = E - E' = E - i (r_n + r_s),$$



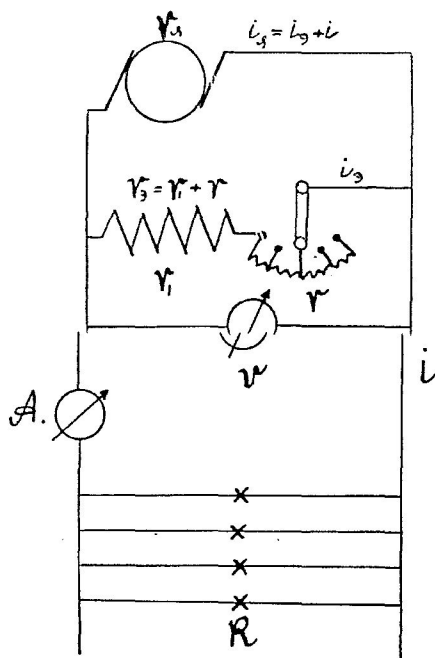
Черт. 35.

сначала быстро возрастаетъ, затѣмъ начинаетъ уменьшаться, съ одной стороны, благодаря увеличенію внутренней потери электродвижущей силы, т. е. E' , съ другой стороны, благодаря замедленію возрастанія E .

При короткомъ замыканіи $e=0$, т. е. вся электродвижущая сила, возбуждаемая въ обмоткѣ якоря расходуетъ на преодоленіе внутреннихъ сопротивленій обмотокъ динамо-машины.

Динамо-машина съ параллельнымъ возбужденіемъ при перемѣнной нагрузкѣ.

При параллельномъ возбужденіи динамо-машины, при которомъ обмотка электромагнитовъ приключена къ борнамъ динамо-машины параллельно внѣшней цѣпи, нагрузка внѣшней цѣпи, т. е. сила тока въ цѣпи, непосредственно не вліяетъ на силу тока въ обмоткѣ электромагнитовъ. Для регулированія возбужденія электромагнитовъ включается послѣдовательно съ ихъ обмоткой регулировочное сопротивление r



Черт. 36.

черт. 36), путемъ измѣненія котораго можно измѣнять въ извѣстныхъ предѣлахъ силу тока i_g въ обмоткѣ электромагнитовъ. Сообразно съ измѣненіемъ силы тока i_g измѣняется создаваемое электромагнитами магнитное поле, въ зависимости отъ чего измѣняется, при условіи сохраненія скорости вращенія якоря, и электродвижущая сила E , возбуждаемая въ обмоткѣ якоря. Если по оси абсциссъ откладывать величины i_g , а по оси ординатъ соответствующія имъ значенія электродвижущей силы E , полученныя при разомкнутой внѣшней цѣпи, такъ какъ въ этомъ случаѣ E равно напря-

женію у борновъ e и поэтому можетъ быть непосредственно измѣренно вольтметромъ, то получится кривая того же вида, что и кривая E на черт. 35. Эта кривая носитъ названіе внутренней или статической характеристики шунтъ-машины.

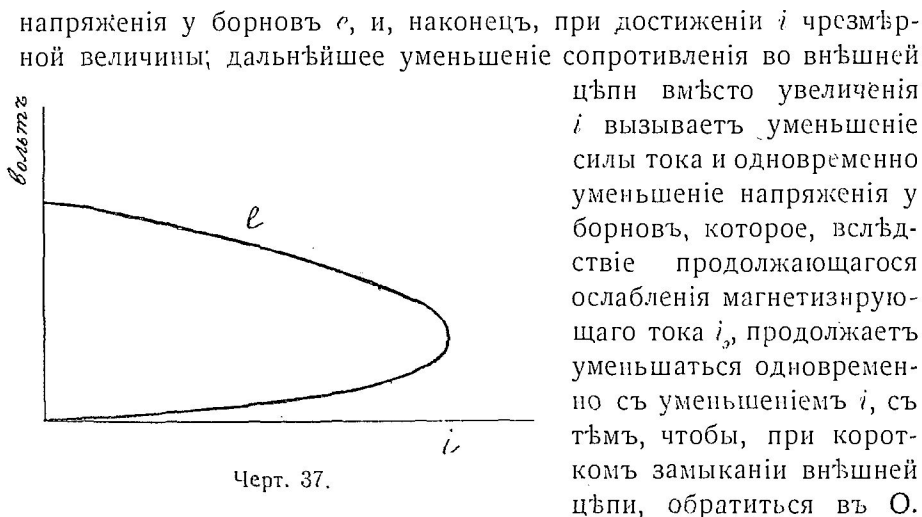
Кривая, представляющая собою зависимость напряженія у борновъ e отъ нагрузки, т. е. силы тока i во внѣшней цѣпи, называется внѣшней характеристикой. Для полученія ея опытнымъ путемъ включаемъ вольтметръ V между борнами динамо-машины, а амперметръ A послѣдовательно во внѣшнюю цѣпь (черт. 36). Регулировочное сопротивление r въ цѣпи обмотки электромагнитовъ устанавливается на какое-либо определенное положеніе, въ которомъ и остается во все время опыта, т. е. сопротивление обмотки электромагнитовъ r_1 вмѣстѣ съ добавочнымъ сопротивленіемъ r составляетъ постоянную величину r_2 . Число оборотовъ якоря при всѣхъ нагрузкахъ поддерживается постояннымъ.

Сопротивленіе R во внѣшней цѣпи, начиная отъ безконечно большой величины, что имѣетъ мѣсто, когда цѣпь разомкнута, постепенно уменьшаемъ путемъ, напримѣръ, увеличенія числа параллельно включаемыхъ лампъ накаливанія.

Когда внѣшняя цѣпь разомкнута, напряженіе у борновъ динамо машины $e = E$, получаемое изъ статической характеристики для соотвѣтствующей силы тока i_0 въ обмоткѣ электромагнитовъ. Сила тока въ якорѣ i_n въ этомъ случаѣ равна i_0 . При замыканіи внѣшней цѣпи на нѣкоторое сопротивление R въ ней появится токъ i , на какую-то величину увеличится и токъ въ обмоткѣ якоря, т. е. $i_n = i + i_0$. Такъ какъ напряженіе e у борновъ динамо-машины равняется напряженію E , возбуждаемому въ обмоткѣ якоря, за вычетомъ той его части E' , которая идетъ на преодоленіе сопротивленія обмотки якоря и зависитъ отъ этого сопротивленія (r_n) и силы тока i_n , т. е.

$$e = E - E' = E - r_n i_n,$$

то по мѣрѣ увеличенія нагрузки во внѣшней цѣпи, а слѣдовательно, и увеличенія i_n , вызывающаго увеличеніе потери напряженія въ обмоткѣ якоря $E' = r_n i_n$, понижается напряженіе у борновъ e . Въ свою очередь, сила тока i_0 въ обмоткѣ электромагнитовъ, находясь въ зависимости отъ напряженія у борновъ ($i_0 = \frac{e}{r_2}$), съ уменьшеніемъ e также уменьшается, вслѣдствіе чего ослабляется магнитный потокъ N въ электромагнитахъ. Такъ какъ $E = n \cdot k \cdot N \cdot 10^{-8}$ вольтъ, гдѣ n и k для данного случая величины постоянныя, то уменьшеніе N вызываетъ уменьшеніе E , а, слѣдовательно, и e и т. д. Такое взаимоотношеніе между вышеупомянутыми величинами обуславливаетъ, съ увеличеніемъ нагрузки во внѣшней цѣпи (i), все большее и большее пониженіе



На черт. 37 представлена внѣшняя характеристика шунтъ-машины, полученная путемъ отложенія по оси абсциссъ величинъ i , а по оси ординатъ соотвѣтствующихъ величинъ e .

Коэффициентъ полезнаго дѣйствія динамо-машинъ.

Коэффициентъ полезнаго дѣйствія η динамо-машины представляетъ собой отношеніе энергіи, отдаваемой во внѣшнюю цѣпь, т. е. $e i$, къ энергіи, сообщаемой динамо-машинѣ. Энергія, сообщаемая динамо-машинѣ частью идетъ на преодоленіе механическихъ и электрическихъ сопротивленій, а остальная часть превращается въ ei . Обозначимъ потери на треніе, гистерезисъ и токи Фуко черезъ P_0 , потерю на нагрѣваніе обмотки якоря — $i_a^2 r_a$, потерю на нагрѣваніе обмотки электромагнитовъ въ шунтъ-машинѣ — ei_s , а въ серіесъ-машинѣ — $i_s^2 r_s$; то η для машины съ параллельнымъ возбужденіемъ выразится:

$$\eta = \frac{ei}{ei + i_a^2 r_a + ei_s + P_0},$$

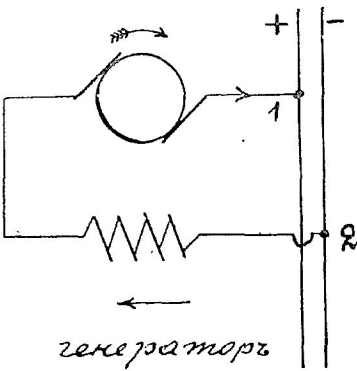
а для динамо-машины съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ

$$\eta = \frac{ei}{ei + i_a^2 r_a + i_s^2 r_s + P_0}.$$

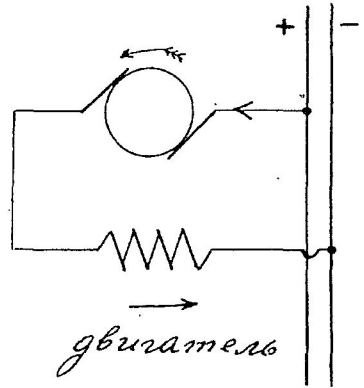
Электродвигатели постоянного тока.

Опытъ показываетъ, какъ о томъ было упомянуто въ главѣ объ электромагнитахъ, что свободный магнитный полюсъ, будучи помѣщенъ въ магнитномъ полѣ, образующемся вокругъ проводника при прохожденіи по нему тока, стремится перемѣщаться въ этомъ полѣ вокругъ проводника (черт. 7). Если магнитный полюсъ закрѣпленъ неподвижно, то стремится перемѣщаться будетъ проводникъ. Такимъ образомъ, между проводникомъ и полюсомъ дѣйствуетъ сила, стремящаяся вызвать относительное перемѣщеніе между тѣмъ и другимъ. Направленіе дѣйствія этой силы опредѣляется на основаніи опыта, согласно котораго сѣверный магнитный полюсъ перемѣщается по направленію линий силъ, которыя, въ свою очередь, направлены по часовой стрѣлкѣ, въ томъ случаѣ, если смотрѣть вдоль проводника вслѣдъ уходящему току. Отсюда слѣдуетъ, что если смотрѣть вдоль провода вслѣдъ уходящему току, въ то время, когда подвижный проводъ находится надъ неподвижнымъ сѣвернымъ полюсомъ, то проводъ будетъ перемѣщаться вправо отъ наблюдателя, а при направленіи тока къ наблюдателю—влѣво отъ наблюдателя. Если обратиться къ разсмотрѣнію направленія силы взаимодѣйствія между проводами, расположенными на цилиндрической поверхности якоря динамо-машины, и полюсными наконечниками электромагнитовъ (черт. 33), то при указанномъ на черт. 33 направленіи токовъ въ проводахъ обмотки якоря, эти провода, а вмѣстѣ съ ними и якорь, оудуть стремиться повернуться противъ часовой стрѣлки. Между тѣмъ указанное на чертежѣ направленіе токовъ въ упомянутыхъ проводахъ получается подъ дѣйствіемъ того же направленія электродвижущихъ силъ, возбуждаемыхъ въ этихъ проводахъ при условіи вращенія якоря по направленію часовой стрѣлки. Это показываетъ, что вращеніе якоря динамо-машины требуетъ затраты соотвѣтственной механической работы, которая, въ свою очередь, частью поглощается механическими и электрическими потерями въ самой динамо-машинѣ, а въ главной своей части превращается въ электрическую работу, отдаваемую динамо-машиной во внѣшнюю цѣль. Очевидно, что если въ обмоткѣ якоря сохранить прежнее направленіе тока, питая обмотку якоря изъ посторонняго источника тока, а также сохранить полярность электромагнитовъ, то якорь, подъ вліяніемъ силы взаимодѣйствія между токами въ проводахъ его обмотки и магнитнымъ полемъ электромагнитовъ, будетъ вращаться противъ часовой стрѣлки и совершать механическую работу.

Такимъ образомъ, направление вращенія якоря динамо-машины, работающей какъ двигатель, при соблюденіи вышеуказанныхъ условій, обратно направленію вращенія того же якоря при работѣ динамо-машины, какъ генератора. Для того, чтобы въ

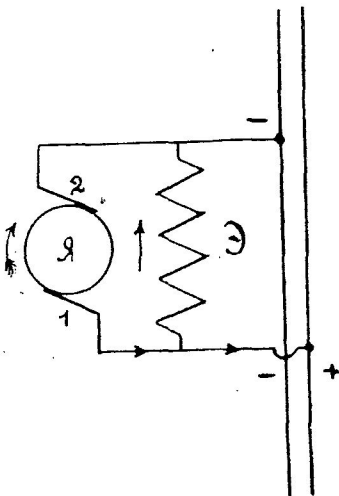


Черт. 38.

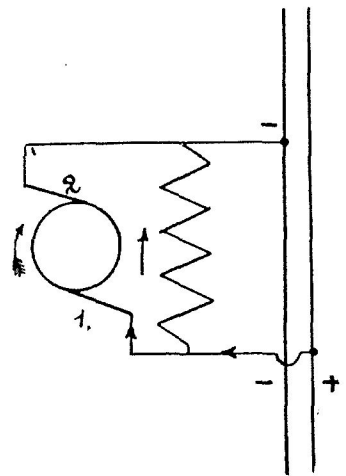


Черт. 39.

электродвигателѣ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ сохранить направленіе тока въ обмоткахъ якоря и электромагнитовъ такое же, какъ и при работѣ его въ качествѣ генератора (черт. 38), необходимо борны у шинъ переключить такимъ образомъ, чтобы



Черт. 40.



Черт. 41.

борнъ 1 былъ присоединенъ къ отрицательной шинѣ, а борнъ 2 къ положительной. Если борновъ не переключать, то токъ пойдетъ въ обратномъ направленіи какъ черезъ обмотку якоря, такъ и черезъ обмотку электромагнитовъ (черт. 39); при этомъ условія

взаимодѣйствія между проводами на окружности якоря и магнитнымъ полемъ электромагнитовъ не измѣнятся и якорь будетъ вращаться въ томъ же направленіи, какъ и при переключеніи борновъ, т. е. въ направленіи противоположномъ вращенію якоря при работѣ динамо-машины, какъ генератора.

Наоборотъ, динамо-машина съ параллельнымъ возбужденіемъ, при оставленіи безъ измѣненія способа ея приключенія къ шинамъ какъ при работѣ ея въ качествѣ генератора, такъ и при работѣ ея въ качествѣ двигателя, сохраняетъ въ обоихъ случаяхъ одно и то же направленіе вращенія якоря. Дѣйствительно, при работѣ динамо-машины, какъ генератора, токъ, выйдя изъ щетки 1 (черт. 40), направляется въ обмотку электромагнитовъ ε и въ шину со знакомъ $+$. При работѣ ея, какъ двигателя (черт. 41), токъ поступаетъ изъ шины $+$ и направляется въ обмотку электромагнитовъ ε въ прежнемъ направленіи, а въ обмотку якоря черезъ щетку 1 въ направленіи, обратномъ, чѣмъ въ предыдущемъ случаѣ. Такимъ образомъ, взаимодѣйствіе между токомъ въ обмоткѣ якоря и магнитнымъ полемъ электромагнитовъ соотвѣтственно измѣняется и создаются условія для вращенія якоря въ томъ же направленіи, какъ и при работѣ динамо-машины, какъ генератора.

Вращающій моментъ, число оборотовъ и мощность электродвигателей постоянного тока.

Сила взаимодѣйствія f между проводомъ общей длиной l , по которому проходитъ токъ I (CGS), и магнитнымъ полемъ, магнитная индукція котораго въ воздухѣ въ мѣстѣ нахождения провода — H , опредѣляется, какъ было указано въ главѣ объ электромагнитахъ, изъ выраженія

$$f = HIl \text{ динъ.}$$

Изъ числа проводовъ, расположенныхъ на окружности якоря, находятся во взаимодѣйствіи съ магнитнымъ полемъ тѣ, которые расположены въ сферѣ дѣйствія магнитнаго поля. Таковыми являются провода, находящіеся въ разсматриваемый моментъ противъ магнитныхъ полюсовъ. Если обозначить длину одного провода черезъ b см., число проводовъ черезъ n и уголъ, опирающійся на дугу полюснаго наконечника, черезъ β , то общая длина подверженныхъ дѣйствію магнитнаго поля проводовъ въ двухполюсной машинѣ опредѣлится въ

$$l = \frac{n \cdot b \cdot 2\beta}{360} \text{ см.}$$

Такимъ образомъ, сила взаимодѣйствія между проводами обмотки якоря и магнитнымъ полемъ электромагнитовъ или, такъ какъ электромагниты неподвижны, сила, дѣйствующая на провода по наружной окружности якоря, выразится въ

$$f = H \cdot I \cdot \frac{n \cdot b \cdot 2\beta}{360} \text{ динъ.}$$

При діаметрѣ якоря въ D см. или радіусѣ $r = \frac{D}{2 \cdot 100}$ метровъ, имѣя въ виду, что $1 \text{ кгр.} = 9,81 \cdot 10^5 \text{ динъ}$, вращающій моментъ M равняется

$$M = H \cdot I \cdot \frac{n \cdot b \cdot 2\beta}{360} \cdot \frac{D}{2 \cdot 100} \cdot \frac{1}{9,81} \cdot 10^{-5} \text{ кгр. мтр.}$$

Выраженіе $\frac{D \cdot \pi \cdot \beta}{360} \cdot b$ представляетъ собою поверхность полюснаго наконечника и, будучи умножено на индукцію въ воздухѣ H , даетъ магнитный потокъ N . Слѣдовательно,

$$M = \frac{N \cdot n \cdot I}{9,81 \cdot \pi} \cdot 10^{-7} \text{ кгр. мтр.}$$

Сила тока въ проводахъ обмотки якоря въ двухполюсной машинѣ равняется $1/2$ полного тока въ якорѣ i_a (i_a въ амперахъ).

Отсюда

$$I = \frac{i_a}{10 \cdot 2}$$

а

$$M = \frac{N \cdot n \cdot i_a}{2\pi \cdot 9,81} \cdot 10^{-8} \text{ кгр. мтр.}$$

Во время вращенія якоря электродвигателя подѣйствіемъ вращающаго момента M , въ обмоткѣ якоря возбуждается, согласно предыдущаго, электродвижущая сила E , которая должна была бы вызвать въ обмоткѣ токъ противоположнаго направленія току, поступающему изъ внѣшней цѣпи, т. е. упомянутая электродвижущая сила E противодѣйствуетъ электродвижущей силѣ e , дѣйствующей у борновъ электродвигателя, и поэтому называется обратной электродвижущей силой.

Обратная электродвижущая сила совершенно аналогична по условіямъ своего возникновенія съ электродвижущей силой, возбуждаемой въ обмоткѣ якоря генератора постоянного тока и, согласно предыдущаго, выражается для двуполюснаго электродвигателя черезъ

$$E = n \cdot k \cdot N \cdot 10^{-8} \text{ вольтъ,}$$

гдѣ n —число проводовъ на периферіи якоря, k —число оборотовъ якоря въ секунду.

Слѣдствіемъ появленія обратной электродвижущей силы является то, что въ обмоткѣ якоря электродвигателя между щетками дѣйствуетъ электродвижущая сила $E_1 = e - E$, идущая на преодоленіе сопротивленія обмотки якоря и опредѣляющая силу тока въ этой обмоткѣ, согласно закону Ома

$$i_a = \frac{E_1}{r_a} = \frac{e - E}{r_a}.$$

Благодаря обратной электродвижущей силѣ, сила тока въ обмоткѣ якоря устанавливается автоматически въ соотвѣтствіи съ нагрузкой электродвигателя. Такъ напримѣръ, при увеличеніи нагрузки, вызывающей увеличеніе момента вѣшнихъ силъ по сравненію съ вращающимъ моментомъ M , скорость вращенія якоря замедляется. Вслѣдствіе этого происходитъ уменьшеніе E , а, слѣдовательно, увеличеніе i_a и такимъ образомъ возстановленіе равновѣсія между моментомъ вѣшнихъ силъ и вращающимъ моментомъ. Съ уменьшеніемъ нагрузки возрастаетъ k и E и уменьшается i_a и M .

Скорость вращенія якоря электродвигателя опредѣляется изъ вышеприведенныхъ двухъ уравненій:

$$k = \frac{E \cdot 10^8}{n \cdot N} = \frac{(e - i_a r_a) 10^8}{n \cdot N}.$$

Мощность, развиваемая электродвигателемъ, равна произведенію вращающаго момента M на угловую скорость $2\pi k$. Для выраженія этой мощности въ ваттахъ необходимо $2\pi k M$ умножить на 9,81 [1 кгр. мтр. = 9,81 · 10⁷ эргъ, 1 джауль = 10⁷ эргъ, 1 ваттъ = 1 джауль (сек.)].

$$P = 2\pi \cdot k \cdot M \text{ кгр. метр./сек.} = 2\pi \cdot k \cdot M \cdot 9,81 \text{ ваттъ.}$$

$$P = \frac{2\pi \cdot k \cdot N \cdot n \cdot i_a \cdot 9,81}{2\pi \cdot 9,81} \cdot 10^{-8} = k \cdot N \cdot n \cdot i_a \cdot 10^{-8} \text{ ваттъ.}$$

Умножая уравненіе

$$e = E + i_a r_a \text{ на } i_a,$$

получимъ

$$e i_a = E i_a + i_a^2 r_a.$$

$e i_a$ представляетъ собою мощность, переданную на якорь электродвигателя, при чемъ часть таковой, а именно $i_a^2 r_a$ идетъ на нагреваніе обмотки якоря, а остальная часть $E i_a$ превращается

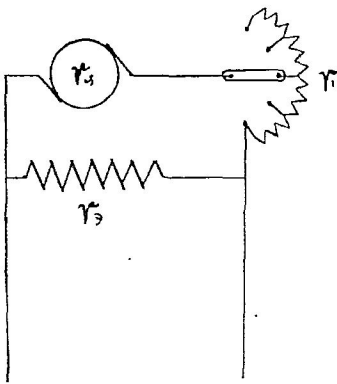
въ механическую мощность, развиваемую электродвигателемъ, считая въ томъ числѣ и полезную мощность на валу электродвигателя и мощность, поглощаемая холостымъ ходомъ такового.

Такимъ образомъ

$$Ei_a = kN \cdot n \cdot i_a \cdot 10^{-8}.$$

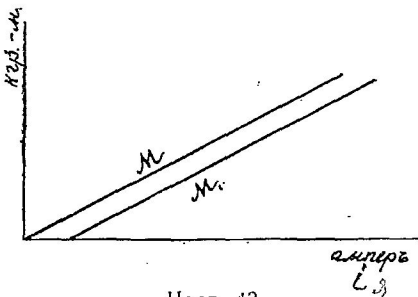
Электродвигатели постоянного тока съ параллельнымъ возбужденіемъ.

Въ томъ случаѣ, когда не требуется регулированія числа оборотовъ электродвигателя, при нормальной его работѣ, обмотка электромагнитовъ приключается непосредственно къ борнамъ (черт. 42), черезъ посредство которыхъ электродвигатель включается въ питательную сѣть. Въ этомъ случаѣ магнетизирующий токъ въ обмоткѣ электромагнитовъ, а, слѣдовательно, и магнитный потокъ N электродвигателя остаются постоянными. Вращающій моментъ электродвигателя при постоянствѣ N измѣняется пропорціонально силѣ тока i_a въ якорѣ и поэтому на діаграммѣ (черт. 43), на которой по оси абсциссъ отложены значенія i_a , а по



Черт. 42.

оси ординатъ соответствующія имъ значенія M , зависимость между этими величинами выразится прямой, проходящей черезъ начало координатъ.



Черт. 43.

Такъ какъ часть вращающаго момента идетъ на преодолѣніе тренія, гистерезиса и токовъ Фуко, то полезный вращающій моментъ M_1 будетъ на соответствующую величину меньше. Часть M , поглощаемая названными потерями, пропорціональна силѣ тока въ якорѣ i_a при холостомъ ходѣ электродвигателя, а

M_1 пропорціоналенъ, слѣдовательно, $i_a - i_0$. Его измѣненіе дается на черт. 43 прямой M_1 .

Число оборотовъ разсматриваемаго электродвигателя въ предѣлахъ его работы отъ холостого хода до полной нагрузки измѣняется очень незначительно, такъ какъ въ выраженіи для числа оборотовъ

$$k = \frac{(e - i_a r_a) 10^8}{n \cdot N}$$

переменной величиной является $i_a r_a$, которая, благодаря незначительности сопротивленія обмотки якоря r_a , мало вліяетъ на $e - i_a r_a$. Поэтому практически можно считать, что разсматриваемый электродвигатель работаетъ при постоянномъ числѣ оборотовъ.

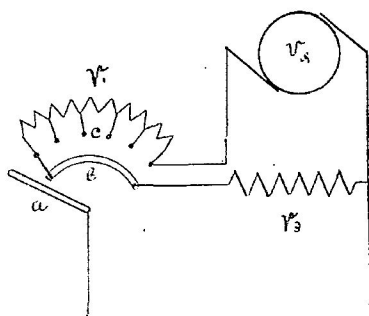
Полезная мощность, развиваемая электродвигателемъ, опредѣляется или изъ произведенія полезнаго вращающаго момента на угловую скорость $\frac{M_a \cdot 2\pi \cdot k}{75}$ л: силъ или изъ произведенія обратной электродвижущей силы на рабочій токъ въ якорѣ — $E (i_a - i_0)$ ваттъ.

$$\eta = \frac{E (i_a - i_0)}{e (i_a + i_0)} = \frac{(e - i_a r_a) (i_a - i_0)}{e (i_a + i_0)}.$$

При пускѣ электродвигателя въ ходѣ обратная электродвижущая сила равна 0. Поэтому во избѣжаніе появленія въ обмоткѣ якоря недопустимой силы тока, такъ какъ въ этотъ моментъ $i_a = \frac{e}{r_a}$, послѣдовательно съ обмоткой якоря включается реостатъ r_1 (черт. 42), который затѣмъ постепенно, по мѣрѣ увеличенія числа оборотовъ якоря, выключается.

При остановкѣ электродвигателя и выключеніи его изъ цѣпи необходимо имѣть въ виду, что, благодаря мгновенному исчезновенію тока въ обмоткѣ электромагнитовъ, также мгновенно долженъ исчезнуть магнитный потокъ въ электромагнитахъ. Измѣненіе же числа линий возбуждаетъ въ виткахъ, окружающихъ магнитный потокъ, электродвижущую силу, величина которой обусловливается быстротой измѣненія линий силъ ($E = - \frac{dN}{dt}$). Такимъ образомъ въ обмоткѣ электромагнитовъ должна появиться электродвижущая сила очень большой величины, которая вызоветъ въ пунктѣ размыканія тока искрообразование, а въ извѣстныхъ случаяхъ можетъ вызвать даже поврежденіе изоляціи обмотки электромагнитовъ. Для устраненія этого явленія обмотки электромагнитовъ и якоря, при помощи различныхъ схемъ включенія, образуютъ между собою замкнутую цѣпь даже и въ моментъ

выключения электродвигателя. Одна из таких схем показана на черт. 44. Рычаг a реостата скользит по контактной полосе b ,



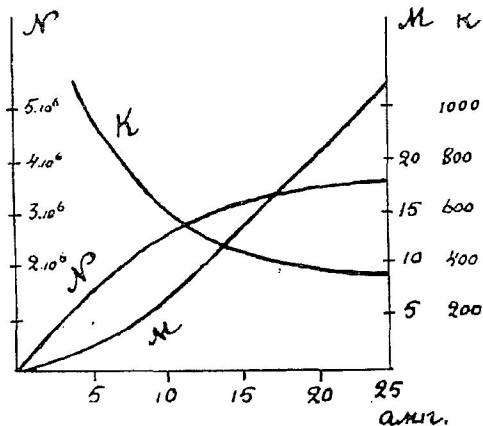
Черт. 44.

соединенной с обмоткой электромагнитов, и в то же время включает через контакты c отдельные секции реостата r_1 , регулирующего ток в обмотке якоря при пуске в ход.

В тех случаях, когда при нормальной работе электродвигателя требуется изменить число его оборотов, то последовательно с обмоткой электромагнитов включается регулировочный реостат, помощью которого изменяется сила магнетизирующего тока i_m , а, следовательно, и N . Из вышеприведенного же выражения для k усматривается, что k изменяется обратно пропорционально N .

Электродвигатели постоянного тока с последовательным возбуждением.

В электродвигателе с последовательным возбуждением магнитный поток N изменяется в зависимости от силы тока i_a , питающего электродвигатель и проходящего как по обмотке якоря, так и по обмотке электромагнитов. При значениях силы



Черт. 45.

тока i_a , при которых сердечники электромагнитов не достигли насыщения, N возрастает почти пропорционально i_a (черт. 45, кривая N), затем по мере насыщения упомянутых сердечников возрастание N все замедляется и в дальнейшем с увеличением i_a почти не изменяется. Вращающий момент M , пока электродвигатель работает в первой части кривой N , изменяется пропорционально

i_a^2 , так как M пропорционален i_a и N , а N в свою очередь пропорционален i_a . С насыщением сердечников электромагни-

товъ M измѣняется пропорціонально i_n , такъ какъ N остается почти постояннымъ (черт. 45, кривая M). Число оборотовъ k электродвигателя съ увеличеніемъ нагрузки, т. е. i_n , уменьшается практически обратно-пропорціонально N , такъ какъ въ выраженіи для k

$$k = \frac{[e - i_n(r_n + r_s)] 10^8}{N \cdot n}$$

числитель почти не измѣняется, въ виду незначительности сопротивленія обмотокъ якоря и электромагнитовъ. Кривая зависимости измѣненія k отъ нагрузки показана на черт. 45. Слѣдуетъ имѣть въ виду, что при мгновенной разгрузкѣ электродвигателя, вслѣдствіе быстраго уменьшенія магнитнаго потока N , число оборотовъ якоря можетъ достигнуть такой чрезмѣрной величины, при которой якорь разлетится въ куски.

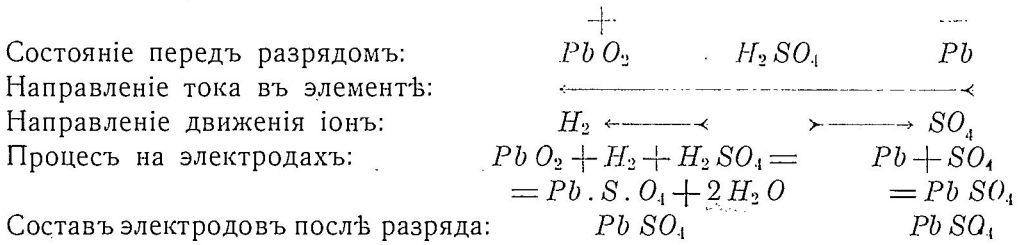
Большой вращающій моментъ M рассматриваемаго электродвигателя при сравнительно небольшихъ силахъ тока i_n , а также измѣняемость числа оборотовъ k дѣлаютъ этотъ электродвигатель особенно пригоднымъ для электрической желѣзнодорожной тяги и для подъемниковъ. Пусканіе электродвигателя въ ходъ производится при помощи регулировочнаго реостата, ограничивающаго начальный токъ въ обмоткѣ якоря и электромагнитовъ до появленія съ возрастаніемъ k обратной электродвижущей силы E .

Аккумуляторы.

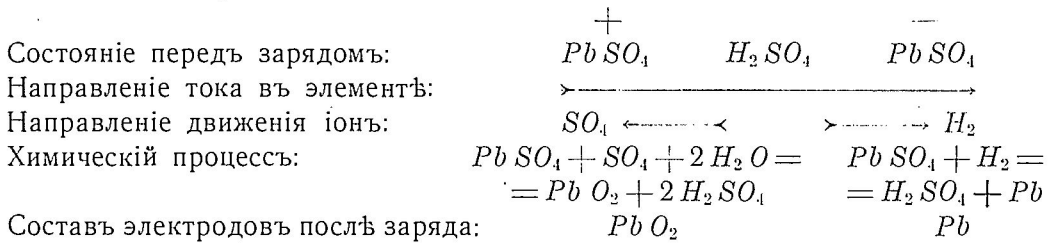
Въ отличіе отъ гальваническихъ элементовъ, которые даютъ токъ за счетъ химическаго разложенія составныхъ частей элемента, и затѣмъ болѣе не возстаиваются, аккумуляторы послѣ отдачи энергіи могутъ снова ее воспринять при помощи заряда отъ посторонняго источника тока для новой отдачи таковой.

Наибольшее распространеніе имѣютъ свинцовые аккумуляторы, которые изготовляются изъ рѣшетчатыхъ пластинъ, причемъ положительная пластина состоитъ изъ перекиси свинца $Pb \cdot O_2$ и обладаетъ большимъ количествомъ мелкихъ ячеекъ, представляя, благодаря этому, большую поверхность соприкосновенія для электролита, а отрицательная пластина снабжена большими ячейками, заполненными окисью свинца, и при зарядѣ превращается въ чистый свинецъ. Электролитомъ служитъ растворъ сѣрной кислоты.

При разрядѣ аккумулятора происходитъ слѣдующій химическій процессъ:

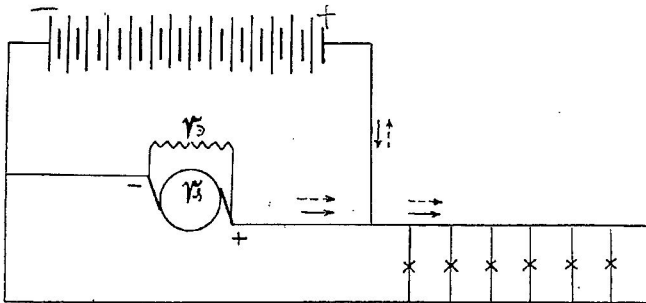


При зарядѣ аккумулятора процессъ происходитъ слѣдующимъ образомъ:



Такимъ образомъ, электролитъ разряженного аккумулятора обладаетъ большимъ количествомъ воды и его плотность меньше, а заряженного наоборотъ больше.

При зарядѣ аккумулятора напряжение у его борновъ съ 2 вольтъ, постепенно повышаясь, въ концѣ заряда быстро поднимается до 2,6—2,7 вольтъ, и при разрядѣ устанавливается около 2 вольтъ, почти не измѣняясь до конца разряда, въ концѣ же разряда начинаетъ быстро падать. Далѣе, 1,7 вольтъ разрядъ не



Черт. 46.

допускается во избежаніе разрушенія пластинъ. Аккумуляторы примѣняются на центральныхъ электрическихъ станціяхъ постоянного тока на которыхъ они включаются

и работаютъ параллельно динамо-машинамъ съ параллельнымъ возбужденіемъ (черт. 46). Такая совмѣстная работа возможна благодаря поясненному на черт. 40 и 41 свойству названныхъ ма-

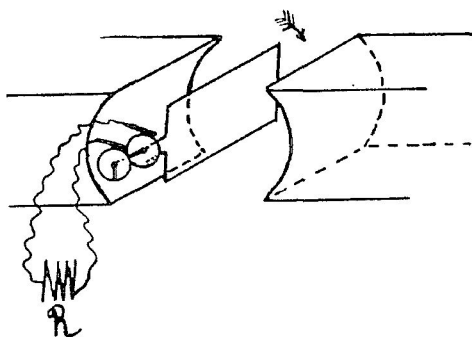
шинъ сохранять одно и то же направленіе вращенія якоря при отдачѣ тока черезъ шины въ сѣть (нормальная работа генератора, черт. 40), такъ и въ случаѣ поступленія тока въ динамо-машину изъ шинъ, вслѣдствіе случайнаго повышенія напряженія между шинами надъ напряженіемъ между борнами динамо-машины (черт. 41). Примѣненіе аккумуляторныхъ батарей на центральныхъ станціяхъ, благодаря совмѣстной работѣ съ динамо-машинами, обезпечиваетъ постоянство напряженія на шинахъ центральной станціи, далѣе даетъ возможность рассчитывать машины не на максимальную нагрузку, появляющуюся въ сѣти въ теченіе нѣсколькихъ часовъ въ сутки, а на среднюю, такъ какъ въ періоды наибольшей нагрузки батарея покрываетъ требующуюся дополнительную нагрузку сѣти по сравненію со средней нагрузкой, и, наконецъ, обезпечиваетъ наилучшее использованіе динамо-машинъ, такъ какъ послѣднія въ періоды наибольшей нагрузки въ сѣти работаютъ на сѣть, а въ періоды малой нагрузки въ сѣти работаютъ на зарядку аккумуляторовъ.

Направленіе токовъ при разрядѣ аккумуляторной батареи, работающей на сѣть параллельно съ динамо-машиной, показано на черт. 46 сплошными стрѣлками, а пунктирными стрѣлками направленіе токовъ, когда динамо-машина работаетъ одновременно и на сѣть и на зарядку аккумуляторной батареи.

Переменный токъ.

Однофазный токъ.

Если концы рамки, вращающейся въ магнитномъ полѣ, соединить съ двумя контактными кольцами (чертежъ 47), то за время перваго полуоборота рамки, считая отъ ея нейтральнаго



Черт. 47.

положенія, въ ней будетъ индуцироваться электродвижущая сила одного направленія и, если внѣшняя цѣпь замкнута на сопротивление R , то въ цѣпи появится токъ того же направленія, при второмъ же полуоборотѣ рамки въ ней будетъ индуцироваться электродвижущая сила противоположнаго направленія и соотвѣтственно переменитъ направленіе и токъ.

Величина и характеръ электродвижущей силы опредѣляется изъ выраженія

$$E' = - \frac{dN'}{dt},$$

гдѣ N' величина магнитнаго потока, охватываемаго рамкой въ данный моментъ.

При нейтральномъ положеніи рамки (перпендикулярно къ оси электромагнитовъ) значеніе N' будетъ максимумъ, а при прочихъ ея положеніяхъ $N' = N \cos \alpha$, гдѣ α уголъ между нейтральную осью и плоскостью рамки. Если рамка дѣлаетъ k оборотовъ въ секунду, то ея угловая скорость равняется $2\pi k$, а дуга, описанная векторомъ $=1$ и отвѣчающая углу α , равняется $2\pi kt$ (t —время отъ выхода рамки изъ нейтральнаго положенія до разсматриваемаго момента).

Отсюда $E' = N \cdot 2\pi \cdot k \cdot 10^{-8} \sin \alpha$ вольтъ.

Если въ рамкѣ имѣется $\frac{n}{2}$ послѣдовательно соединенныхъ между собою витковъ (n —число проволокъ на окружности барабана, на который намотана рамка), то

$$E' = \pi \cdot N \cdot k \cdot n \cdot 10^{-8} \cdot \sin \alpha.$$

при $\sin \alpha = 1$

$$E_{\max} = \pi N k n 10^{-8}.$$

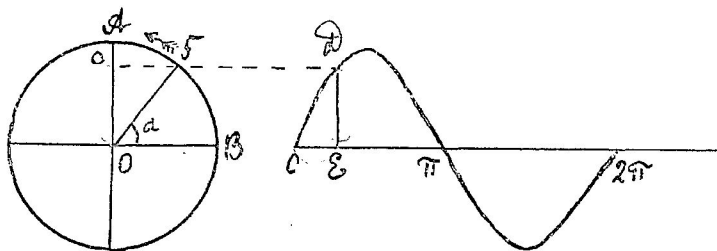
Такимъ образомъ E опредѣляется для любого момента изъ выраженія

$$E' = E_{\max} \cdot \sin \alpha.$$

Въ зависимости отъ E соотвѣтственно измѣняется и сила тока во внѣшней цѣпи I , т. е.

$$I' = I_{\max} \cdot \sin \alpha.$$

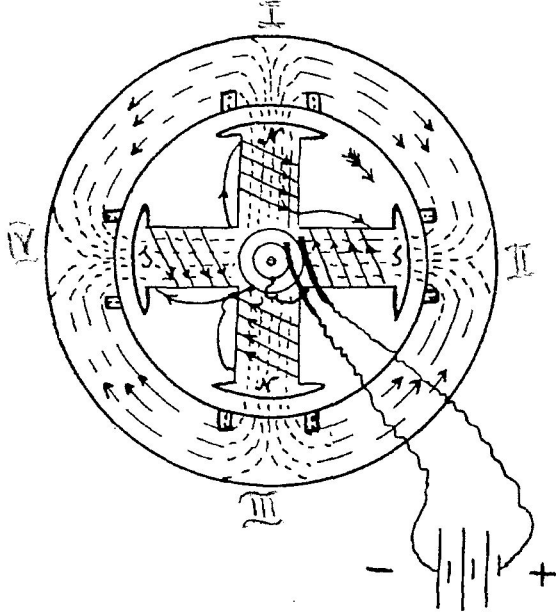
Промежутокъ времени, въ теченіе котораго α измѣняется отъ 0 до 2π , называется временемъ одного періода. Число періодовъ въ секунду обозначается знакомъ $\sim$ (видъ синусоидальной кривой). Наиболѣе быстрое и наглядное рѣшеніе вопросовъ при обращеніи съ величинами переменнаго тока даетъ векторная діаграмма (черт. 48). Въ этой діаграммѣ векторъ $OF = E_{\max}$ (или $I_{\max}$) вращается съ постоянной угловой скоростью $\omega = 2\pi \sim$. При двуполусной машинѣ векторъ вращается съ той же скоростью, что и машина. Направленіе вращенія вектора принимается въ дальнѣйшемъ обратно направленію часовой стрѣлки. α —уголъ составляемый векторомъ съ осью абсциссъ. Значеніе $E' = E_{\max} \sin \alpha$ въ любой моментъ дается проекціей вектора на ось ординатъ. Зависимость между векторной діаграммой и синусоидальной кривой ясна изъ черт. 48. Въ синусоидальной



Черт. 48.

кривой по оси абсциссъ развернута окружность векторной діаграммы, а по оси ординатъ отложены соотвѣтствующія значенія $E_{\max} \sin \alpha$.

Однофазный переменный ток употребляется преимущественно для питания источников освѣщенія. Такъ какъ этотъ токъ мѣняется въ теченіе каждаго періода и по величинѣ и по направленію, то при маломъ числѣ періодовъ, а именно, меньше 25 въ секунду, какъ дуговыя лампы, такъ и лампы накаливанія, даютъ мигающій свѣтъ. Во избѣжаніе сего переменный токъ для освѣщенія примѣняется большею частью въ предѣлахъ отъ 40 до 50 періодовъ въ секунду. Для полученія такого большого числа періодовъ генераторы переменнаго тока изготовляются многополюсными. Попутно увеличивается и электродвижущая сила у борновъ генератора, благодаря большому количеству включенныхъ послѣдовательно рамокъ. Практика конструирования генераторовъ переменнаго тока показала, что наиболѣе цѣлесообразнымъ типомъ являются генераторы съ вращающимися и расположенными внутри электромагнитами (черт. 49). Обмотка же, въ которой индуцируется электродвижущая сила, неподвижна и располагается въ новѣйшихъ типахъ генераторовъ въ пазахъ, вырѣзанных на внутренней поверхности желѣзнаго кольца (статора), составляемаго изъ желѣзныхъ листовъ, изолированныхъ другъ отъ друга бумажной изоляціей для устраненія токовъ Фуко. На черт. 49—51 изображены схематически четырехполюсный генераторъ однофазнаго тока. Электромагниты возбуждаются отъ посторонняго источника постоянного тока, который поступаетъ въ обмотку электромагнитовъ



Черт. 49.

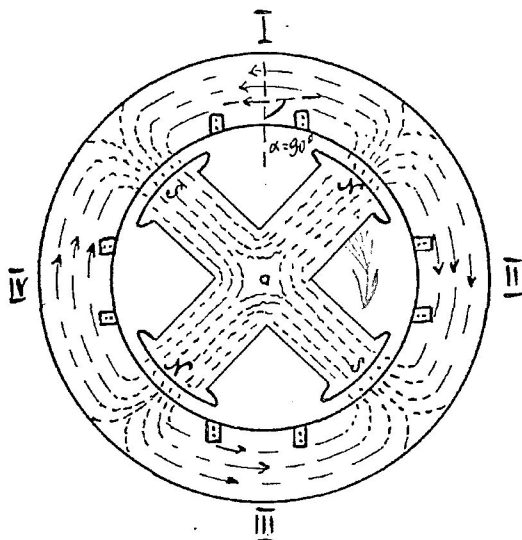
черезъ 2 контактныхъ кольца. Число послѣдовательно включаемыхъ рамокъ статорной обмотки соотвѣтствуетъ числу полюсовъ электромагнитовъ. Одна изъ схемъ включенія рамокъ, отвѣчающая черт. 49—51, показана на черт. 52.

При положеніи электромагнитовъ, изображенномъ на черт. 49, полюса ихъ находятся противъ рамокъ статора и магнитные по-

токи, выходя из полюсов NN , проходят через рамки I, III , затѣмъ раздвѣиваются и по желѣзному сердечнику статора направляются къ рамкамъ II, IV . Передъ рамками II, IV половинные магнитные потоки отъ противоположныхъ полюсовъ NN соединяются, проходятъ черезъ рамки II, IV и по сердечникамъ электромагнитовъ SS возвращаются въ электромагниты NN .

При вращеніи электромагнитовъ перемѣщаются и магнитные потоки, сохраняя свое взаимное расположение по отношенію къ полюсамъ.

Въ положеніи электромагнитовъ, изображенномъ на черт. 50 ($1/8$ оборота) линіи силъ магнитныхъ потоковъ проходятъ по сердечнику статора параллельно плоскости рамокъ $I—IV$. Послѣ $1/4$ оборота электромагнитовъ (черт. 51) линіи силъ занимаютъ расположеніе, подобное изображенному на



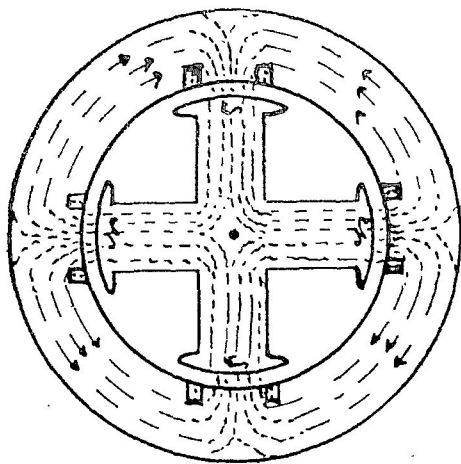
Черт. 50.

черт. 49, но имѣютъ противоположное направленіе. При дальнѣйшемъ $1/8$ оборота — линіи силъ занимаютъ расположеніе, аналогичное изображенному на черт. 50, но съ обратнымъ знакомъ. Наконецъ, послѣ половины оборота электромагнитовъ линіи силъ принимаютъ положеніе то же, что и на черт. 49. Число линій силъ, охватываемыхъ рамками $I—IV$, достигаетъ наибольшаго значенія, а именно N , при положеніи электромагнитовъ согласно черт. 49. Затѣмъ оно уменьшается и достигаетъ 0 при положеніи электромагнитовъ согласно черт. 50. При дальнѣйшемъ вращеніи электромагнитовъ число линій силъ, перемѣнившихъ теперь направленіе, начинаетъ возрастать до тахѣтима (черт. 51) и т. д.

Это число линій силъ измѣняется пропорціонально $\cos \alpha$, т. е. равно $N \cos \alpha$, гдѣ α уголъ, составляемый осью рамокъ съ направленіемъ линій силъ, проходящихъ черезъ рамки. На черт. 49 $\alpha = 0$, число линій силъ равно N , на черт. 50 $\alpha = 90^\circ$, число линій силъ, проходящихъ черезъ рамки = 0.

Отсюда слѣдуетъ, что электродвижущая сила E , наводимая въ рамкахъ $I—IV$, пропорціональна $N \sin \alpha$ и, слѣдовательно, при

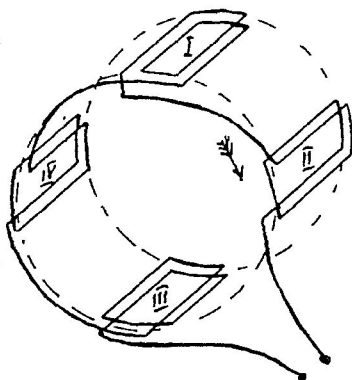
положеніи электромагнитовъ согласно черт. 49 она равна 0, далѣе она возрастаетъ до максимумъ (черт. 50), снова уменьшается до 0 (черт. 51), затѣмъ возра-



Черт. 51.

стаетъ, но съ противоположнымъ знакомъ, до максимумъ (положеніе электромагнитовъ послѣ $\frac{3}{8}$ оборота) и, наконецъ, уменьшается до 0 (положеніи электромагнитовъ черезъ $\frac{1}{2}$ оборота). Такимъ образомъ въ четырехполусной машинѣ E совершаетъ полный цикл или одинъ періодъ (черт. 48) въ то время, когда электромагниты дѣлають $\frac{1}{2}$ оборота или одному обороту генератора отвѣчаютъ два періода электродвижущей силы,

а слѣдовательно и тока. Соответственно при одномъ оборотѣ 6-полуснаго генератора получаются 3~, 8-полуснаго—4~, 2р полюснаго—р~. Электродвижущая сила въ 2р полюсномъ генераторѣ по сравненію съ электродвижущей силой двухполуснаго генератора, при одинаковой скорости вращенія обѣихъ машинъ, въ п разъ больше, такъ скорость появленія и исчезновенія линий силъ въ рамкахъ перваго генератора въ р разъ больше, нежели во второмъ. Поэтому



Черт. 52.

$$E = \pi N p k n 10^{-8} \cdot \sin \alpha$$

$$E_{\max} = \pi N p k n \cdot 10^{-8}.$$

Такъ какъ $p k = \sim$, т. е. числу періодовъ въ секунду, то

$$E' = \pi N \sim n 10^{-8} \cdot \sin \alpha$$

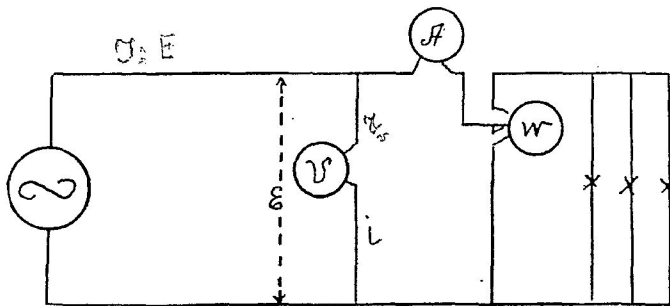
$$E_{\max} = \pi N \sim n 10^{-8}.$$

Необходимо имѣть въ виду, что въ выраженіи для E уголъ α измѣряется градусами, равными $\frac{1}{360}$ полного періода, и опредѣляется положеніемъ вектора въ векторной діаграммѣ (черт. 48).

Эффективныя значенія напряженія и тока.

Слѣдуетъ отмѣтить, что какъ мгновенныя значенія E' , I' , такъ и ихъ наибольшія значенія $E_{\max}$, $I_{\max}$, непосредственно существующими въ практикѣ измѣрительными приборами неопредѣляются. Эти приборы показываютъ лишь среднее значеніе того эффекта, который на нихъ производитъ проходящій черезъ нихъ токъ.

Приборы, служащіе для измѣренія разности потенциаловъ или напряженія между двумя точками, силы тока и мощности потребляемой энергіи, носятъ названіе вольтметровъ, амперметровъ и ваттметровъ и всѣ основаны на дѣйствіи тока ¹⁾. Включеніе этихъ приборовъ въ цѣпь для производства соотвѣствующихъ измѣреній показано на черт. 53. Вольтметръ V включенъ парал-



Черт. 53.

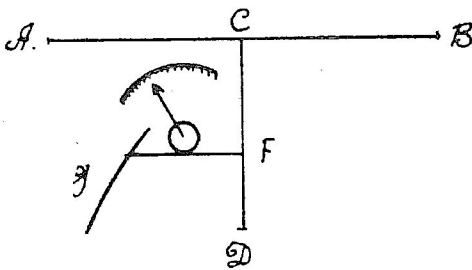
лельно генератору и потребителю тока, напр. лампочкамъ накаливанія, и черезъ него проходитъ токъ $i = \frac{E}{r_v}$, гдѣ r_v сопротивленіе вольтметра. Такъ какъ этотъ токъ долженъ быть по возможности очень малъ (доли ампера), чтобы не вліять замѣтнымъ образомъ на показаніе амперметра (A), то для этого сопротивленіе вольтметра r_v дѣлается весьма значительнымъ. Наоборотъ, сопротивленіе амперметра r_a , которое включается послѣдовательно въ главную цѣпь, должно быть очень мало (доли ома), чтобы не вызывать сколько-нибудь замѣтнаго паденія напряженія. Показанія вольтметра пропорціональны силѣ тока i , а показанія амперметра—пропорціональны силѣ главного тока въ цѣпи I .

Ваттметръ снабженъ двумя сопротивленіями, отвѣчающими сопротивленіямъ вольтметра и амперметра и соотвѣственно включаемыми. Изъ приборовъ, примѣнимыхъ одинаково какъ для постоянного, такъ и для переменнаго тока, главнѣйшими по прин-

¹⁾ Кромѣ статическихъ вольтметровъ.

ципу, на которомъ основано ихъ дѣйствіе, являются тепловые, электромагнитные и динамометрическіе.

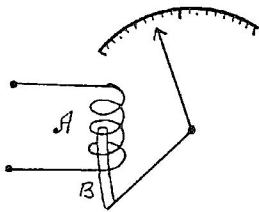
Дѣйствіе тепловыхъ приборовъ основано на нагреваніи проводника, по которому проходитъ токъ, и на происходящемъ при



Черт. 54.

этомъ его удлинении. На черт. 54 показано схематическое устройство тепловыхъ приборовъ. АВ платино-серебряная нить, натянутая между точками А и В и оттягиваемая пружиной g при помощи двухъ шелковинокъ, изъ которыхъ одна охватываетъ маленькій блокъ съ

указательной стрѣлкой. При нагреваніи подѣйствіемъ тока проволоки АВ, она удлиняется и нить оттягивающая ее, поворачиваетъ блокъ вмѣстѣ со стрѣлкой.

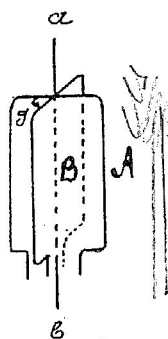


Черт. 55.

Электромангнитные приборы основаны на дѣйствіи соленоида А, втягивающаго сердечникъ изъ мягкаго желѣза В (черт. 55).

Динамометрическіе приборы состоятъ изъ двухъ рамокъ А В (черт. 56), изъ коихъ одна неподвижна, а другая подвижна и снабжена указательной стрѣлкой, съ общемою осяю вращенія ab и удерживаемыхъ пружиной g въ положеніи перпендикулярномъ другъ другу.

При прохожденіи по рамкамъ тока онѣ стремятся стать въ положеніе параллельное другъ другу.



Черт. 56.

Показаніе тепловыхъ приборовъ пропорціонально $I^2 R$, гдѣ R сопротивленіе платино-серебряной нити.

Въ электромагнитныхъ приборахъ магнитное поле соленоида пропорціонально силѣ тока I , проходящаго по соленоиду. Намагничиваніе желѣзнаго сердечника, въ свою очередь, пропорціонально силѣ магнитнаго поля соленоида. А такъ какъ дѣйствіе приборовъ основано на взаимодействіи магнитнаго тока соленоида и магнитнаго желѣзнаго сердечника, то показаніе этихъ приборовъ пропорціонально I^2 .

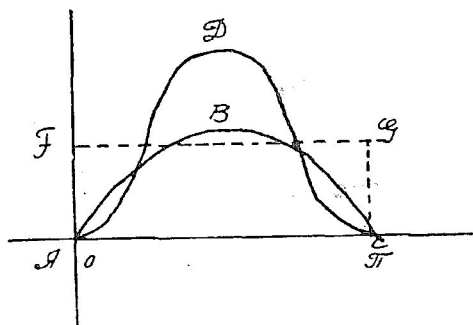
Точно также пропорціонально I^2 и показаніе динамометрическихъ приборовъ, основанныхъ на взаимодействіи двухъ токовъ. Вслѣдствіе инерціи подвижныхъ частей вышеуказанныхъ приборовъ, ихъ показанія пропорціональны

величинѣ, средней изъ суммы мгновенныхъ значений I^2 за половину періода. На черт. 57 кривая ABC даетъ измѣненіе силы тока $I = I_{\max} \sin \alpha$ за половину періода. Кривая ADC —измѣненіе I^2 за ту же половину періода. Среднему значенію ординатъ кривой ADC и соответствуетъ показаніе измѣрительныхъ приборовъ.

Величина эта $AI^2 = I^2$ опредѣляется изъ уравненія

$$I^2 \pi = \int_0^{\pi} I_{\max}^2 \sin^2 \alpha \, d\alpha$$

$$I^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_{\max}^2 \sin^2 \alpha \, d\alpha.$$



Черт. 57.

Интегрируя по частямъ получаемъ

$$I^2 = \frac{I_{\max}^2}{\pi} \left[\frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \right]_0^{\pi} = \frac{I_{\max}^2}{2}$$

$$I = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} ;$$

Это уравненіе даетъ зависимость между силой тока I , измѣряемой непосредственно измѣрительными приборами и носящей названіе „эффективной“, и $I_{\max}$ — наибольшимъ значеніемъ силы тока за періодъ.

Такъ какъ напряженіе E , измѣряемое вольтметрами, пропорціонально силѣ тока, проходящаго черезъ эти приборы, то вышеприведенное соотношеніе между эффективной силой тока и максимальной непосредственно приложимо къ напряженію, т. е.

$$E = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} ;$$

гдѣ E — эффективная величина напряженія.

Подставляя вмѣсто $E_{\max}$ его значеніе, получаемъ

$$E = \frac{\pi N \sim 10^{-8}}{\sqrt{2}} = 2,2 N \sim n 10^{-8}.$$

Въ случаѣ, если витки одной и той же рамки расположены не въ общихъ пазахъ статора, а занимаютъ отдѣльные пазы, а также, если распредѣленіе магнитныхъ силовыхъ линий по периферіи внутренней поверхности статора не вполне слѣдуетъ синусоидальной зависимости, то коэффициентъ въ выраженіи для E отличенъ отъ 2,2 и опредѣляется въ зависимости отъ вышеуказанныхъ факторовъ.

Электродвижущая сила самоиндукции.

Если через обмотку, навитую въ видѣ катушки на желѣз-
ный сердечникъ, пропускать переменный токъ, то въ соотвѣтствіи
съ силой и направленіемъ въ каждый данный моментъ тока въ
обмоткѣ будетъ измѣняться въ желѣзномъ сердечникѣ по силѣ и
направленію магнитный потокъ.

Магнитный потокъ по аналогіи съ закономъ Ома равенъ ма-
гнитодвижущей силѣ $0,4 \pi \cdot n \cdot I$, дѣленной на магнитное сопро-
тивленіе цѣпи $\frac{l}{\mu S}$, т. е.

$$N' = \frac{0,4 \pi n I' \mu S}{l},$$

гдѣ n —число витковъ въ катушкѣ,

S —сѣченіе желѣзнаго сердечника,

l —средняя длина пути линій силъ.

За промежутокъ времени dt сила тока измѣнится на вели-
чину dI' , а вмѣстѣ съ тѣмъ и магнитный потокъ на величину dN' .
Вслѣдствіе же измѣненія по времени силы магнитнаго потока, въ
каждомъ виткѣ катушки индуцируется электродвижущая сила,
противодѣйствующая электродвижущей силѣ внѣшней цѣпи и
равная $E'_s = - \frac{dN'}{dt} \cdot 10^{-8}$ вольтъ. При числѣ послѣдовательно
соединенныхъ въ катушкѣ n виткахъ электродвижущая сила E'_s ,
носящая названіе электродвижущей силы самоиндукции, рав-
няется $n \frac{dN'}{dt} \cdot 10^{-8}$ вольтъ, или по подстановкѣ вмѣсто N' его
значенія

$$E'_s = - \frac{4\pi n^2 \mu S}{l} \cdot 10^{-9} \cdot \frac{dI'}{dt}.$$

Выраженіе

$$\frac{4\pi \cdot n^2 \cdot \mu \cdot S}{l} \cdot 10^{-9}$$

носитъ названіе коэффициента самоиндукции и обозначается че-
резъ L , при чемъ единицей измѣренія является 1 Генри $= 10^9 CGS$.

Отсюда

$$E'_s = - L \frac{dI'}{dt} \text{ вольтъ.}$$

Такъ какъ мгновенное значеніе переменнаго тока

$$I' = I_{\max} \sin \alpha,$$

гдѣ $\alpha = \omega t$, т. е. угловой скорости вектора тока, умноженной на время до разсматриваемого момента, то

$$\frac{dI'}{dt} = I_{\max} \omega \cos \alpha,$$

а

$$E'_s = -L\omega \cdot I_{\max} \cdot \cos \alpha.$$

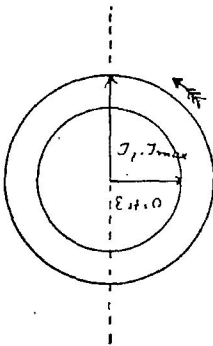
Наибольшаго своего значенія E'_s достигаетъ при $\alpha = 180^\circ$, когда $\cos \alpha = -1$.

$$E'_{s \max} = L\omega I_{\max}.$$

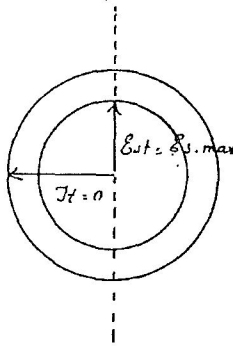
Дѣля обѣ части уравненія на $\sqrt{2}$, переходимъ отъ наибольшихъ значеній къ эффективнымъ.

$$E'_s = L\omega I.$$

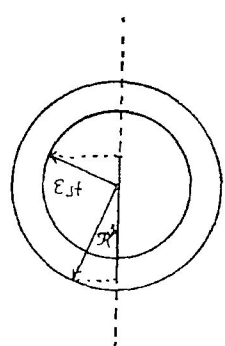
Зависимость между I' и E'_s въ отношеніи времени опредѣляется векторной діаграммой (черт. 58—60) и полученной изъ нея



Черт. 58.

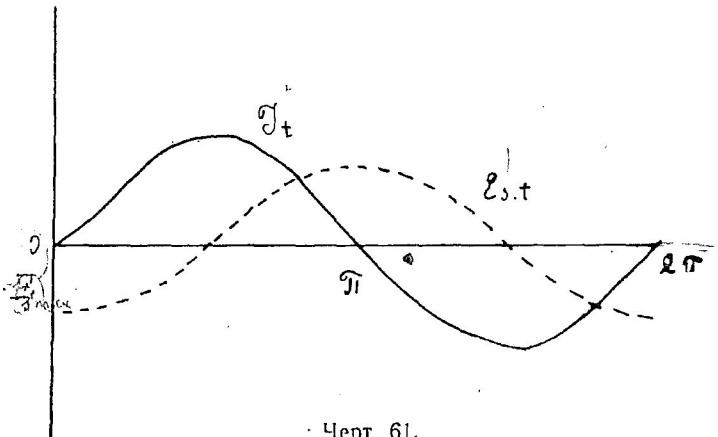


Черт. 59.



Черт. 60.

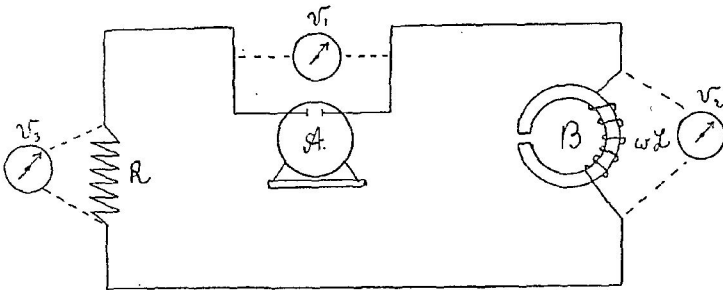
синусоидальной кривой (черт. 61), изъ которыхъ видно, что E'_s по фазѣ отстаетъ отъ I' на 90° .



Черт. 61.

Законъ Ома для переменнаго тока.

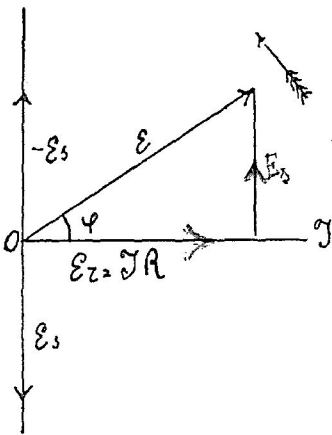
Положимъ, что въ цѣпь генератора A (черт. 62) включены послѣдовательно омическое ¹⁾ сопротивление R и катушка самоиндукціи B , витки которой состоятъ изъ толстой проволоки



Черт. 62.

и поэтому ея омическое сопротивление ничтожно мало по сравнениюъ съ R .

Требуется выяснитъ зависимость между напряженіемъ у борновъ генератора E , силой тока I въ цѣпи, сопротивленіемъ R и сопротивленіемъ катушки самоиндукціи съ коэффициентомъ самоиндукціи L . V_1 , V_2 , V_3 — вольтметры, измѣряющіе напряжение у борновъ генератора, катушки самоиндукціи и омического сопротивления R .



Черт. 63.

Напряжение у борновъ генератора должно частью расходоваться на преодоленіе омического сопротивления, частью должно идти на поддержаніе равновѣсія съ противодействующимъ вліяніемъ электродвижущей силы самоиндукціи E_s , развиваемой катушкой самоиндукціи B .

Въ векторной діаграммѣ (черт. 63) составляющая напряженія у борновъ генератора, идущая на преодоленіе омического сопротивления R и равная IR , совпадаетъ по фазѣ съ направлениемъ тока. Электродвижущая сила самоиндукціи E_s отстаетъ отъ век-

¹⁾ т. е. отвѣчающее закону Ома, а именно: $R = \frac{E}{I}$.

тора тока на 90° и въ діаграммѣ направлена внизъ. Составляющая напряженіе у борновъ генератора, компенсирующая вліяніе E_s , должна быть, слѣдовательно, направлена вверхъ и быть равной E_s , но обратнаго знака. Напряженіе E у борновъ генератора является геометрической суммой двухъ вышеупомянутыхъ составляющихъ. Мгновенныя значенія всѣхъ этихъ величинъ для любого момента, векторы коихъ, сохраняя взаимное расположеніе, указанное на черт. 63, вращаются съ угловой скоростью $\omega = 2\pi \cdot \infty$, опредѣляются изъ діаграммы, какъ проекціи на ось ординатъ.

Изъ векторнаго треугольника (черт. 63) имѣемъ

$$E^2 = (IR)^2 + E_s^2$$

или, такъ какъ

$$E_s = I\omega L,$$

$$E^2 = (IR)^2 + (I\omega L)^2,$$

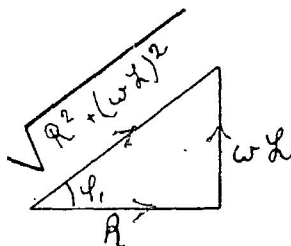
откуда

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}.$$

$\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ — представляетъ собой сопротивленіе въ цѣпи переменнаго тока и носитъ названіе „кажущагося сопротивленія“. ωL называется „индуктивнымъ сопротивленіемъ“.

Такъ какъ и 1 Генри и 1 Омъ равны 10^9 единицъ CGS, то произведеніе ωL даетъ непосредственно индуктивное сопротивленіе въ омахъ. Соотношеніе $R, \omega L, \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ можетъ быть представлено прямоугольнымъ треугольникомъ (черт. 64). Изъ черт. 63 видно, что токъ въ цѣпи, при наличіи въ ней индуктивнаго сопротивленія, не совпадаетъ по фазѣ съ напряженіемъ у борновъ генератора, а составляетъ съ этимъ напряженіемъ уголъ φ , тангенсъ котораго опредѣляется изъ векторнаго треугольника черт. 64

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R}.$$



Черт. 64.

Мощность или энергія переменнаго тока.

Средняя мощность переменнаго тока или работа, совершаемая имъ въ секунду, опредѣляется какъ средняя изъ мгновенныхъ значеній произведенія $E' I'$.

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E' I' d\alpha.$$

Если E и I по фазѣ не совпадаютъ, а составляютъ другъ съ другомъ уголъ φ , то въ тотъ моментъ, когда

$$I' = I_{\max} \sin \alpha, E' = E_{\max} \sin (\alpha + \varphi).$$

Отсюда

$$P = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_{\max} I_{\max} \sin (\alpha + \varphi) \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha.$$

Такъ какъ

$$\sin (\alpha + \varphi) = \sin \alpha \cos \varphi + \cos \alpha \cdot \sin \varphi,$$

то

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi} \sin \alpha \cdot \sin (\alpha + \varphi) \cdot d\alpha &= \int_0^{\pi} \sin^2 \alpha \cdot \cos \varphi \cdot d\alpha + \\ &+ \int_0^{\pi} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \sin \varphi \cdot d\alpha. \end{aligned}$$

Общее значеніе второго интеграла равняется $\sin \varphi \cdot \frac{\sin^2 \alpha}{2}$ и при обоихъ предѣлахъ обращается въ 0.

Слѣдовательно

$$\int_0^{\pi} \sin \alpha \cdot \sin (\alpha + \varphi) d\alpha = \cos \varphi \int_0^{\pi} \sin^2 \alpha d\alpha = \cos \varphi \frac{\pi}{2}.$$

$$P = \frac{E_{\max} I_{\max}}{2} \cdot \cos \varphi = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \cdot \cos \varphi = EI \cos \varphi.$$

Пользуясь этимъ уравненіемъ, измѣривъ предварительно ватметромъ потребляемую въ цѣпи энергію P , вольтметромъ—напряжение E и амперметромъ силу тока I можно опредѣлить

$$\cos \varphi = \frac{P}{EI}.$$

Емкостное напряженіе.

Если въ цѣль съ источникомъ напряженія постояннаго тока включить приборъ, называемый конденсаторомъ и состоящій изъ изолированныхъ другъ отъ друга металлическихъ пластинъ, то въ пластину, соединяемую съ положительнымъ полюсомъ въ моментъ включенія, устремится токъ и въ ней произойдетъ какъ бы скопленіе электричества, а на противоположной пластинѣ разряженіе, при чемъ конденсаторъ получитъ опредѣленный зарядъ Q , величина котораго зависитъ отъ напряженія или разности потеціаловъ

у его борновъ и отъ его емкости C . Если затѣмъ напряженіе у его борновъ начать повышать, то во время повышенія напряженія будетъ происходить увеличеніе заряда и самая скорость увеличенія заряда Q въ единицу времени, или что тоже величина заряднаго тока I' будетъ пропорціональна скорости увеличенія напряженія, т. е. $\frac{dQ}{dt} = I' = C \frac{dE'}{dt}$.

Если конденсаторъ включить въ цѣпь переменнаго тока, то съ измѣненіемъ величины напряженія у борновъ конденсатора и его знака зарядъ будетъ попеременно переходить съ одной пластины на другую и зарядный токъ будетъ по величинѣ и направленію слѣдовать синусоидальному закону.

$$\text{Такъ какъ } E' = E_{\max} \sin \alpha = E_{\max} \sin \omega t;$$

то

$$\frac{dQ}{dt} = I' = C \omega E_{\max} \cos \alpha.$$

$I_{\max}$ будетъ при

$$\alpha = 0; I_{\max} = C \omega E_{\max}.$$

Для общаго случая на $\sqrt{2}$, переходимъ къ эффективнымъ значеніямъ:

$$I = C \omega E.$$

Зарядъ въ конденсаторѣ создаетъ въ немъ электрическое давленіе или напряженіе, которое прямо противоположно напряженію, развиваемому генераторомъ у борновъ конденсатора. Поэтому численное значеніе напряженія конденсатора E_c или емкостнаго напряженія можетъ быть выведено изъ предыдущаго выраженія, т. е.

$$E_c = \frac{I}{C \omega}$$

Если въ цѣпи генератора, съ включеннымъ въ нее конденсаторомъ, нѣтъ ни омическаго, ни индуктивнаго сопротивленія, то, какъ это усматривается изъ вышеприведенной формулы:

$$I' = C \omega E_{\max} \cos \alpha;$$

составляющая напряженія у борновъ генератора, которая должна уравновѣшивать емкостное напряженіе, отстаетъ отъ тока на 90° ($E_t = 0$; $J_t = J_{\max}$; $E_t = E_{\max}$; $J_t = 0$), а емкостное напряженіе соответственно опережаетъ токъ на 90° .

Въ томъ случаѣ, когда въ цѣпь генератора включены послѣдовательно омическое сопротивленіе R , катушка самоиндукціи съ коэффиціентомъ L и конденсаторъ съ емкостью C , соотно-

опредѣляется

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{CL}}$$

$$\omega = \frac{1}{2\pi \sqrt{CL}}$$

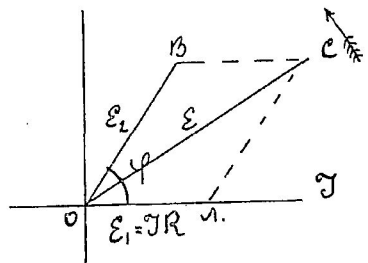
Въ этомъ случаѣ сила тока въ цѣпи, опредѣляемая изъ уравненія $I = \frac{E}{R}$, можетъ достигать чрезмѣрной величины, точно также, какъ значенія эл. воз. силы самоиндукціи $L\omega I$ и емкостнаго напряженія $\frac{I}{C\omega}$.

Это явленіе называется резонансомъ.

Способъ трехъ вольтметровъ.

Потребляемая въ цѣпи переменнаго тока энергія измѣряется нормально ваттметромъ. Въ частномъ случаѣ, когда въ цѣпи имѣются послѣдовательно включенныя омическое сопротивление R и индуктивное ωL (черт. 62), энергія, потребляемая индуктивнымъ сопротивленіемъ, можетъ быть опредѣлена помощью трехъ вольтметровъ, включаемыхъ согласно чертежа 62.

Въ векторной діаграммѣ (черт. 66), составляющая напряженіе у борновъ генератора, идущая на преодоленіе омическаго сопротивленія $E_1 = IR$, представлена векторомъ OA . Составляющая того же направленія $E_2 = OB$, идущая на преодоленіе индуктивнаго сопротивленія, опережаетъ токъ не на 90° , а на уголъ $\varphi < 90^\circ$, такъ какъ это сопротивление, кромѣ индуктивнаго, имѣетъ нѣкоторое омическое сопротивление (сопротивленіе обмотки катушки B). OC — геометрическая сумма E_1 и E_2 и представляетъ собой напряженіе E у борновъ генератора. Изъ треугольника OAC имѣемъ:



Черт. 66.

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2 E_1 E_2 \cos \varphi$$

откуда

$$\cos \varphi = \frac{E^2 - E_1^2 - E_2^2}{2 E_1 E_2}$$

Энергія, поглощаемая катушкой, $P = E_2 I \cos \varphi$, или

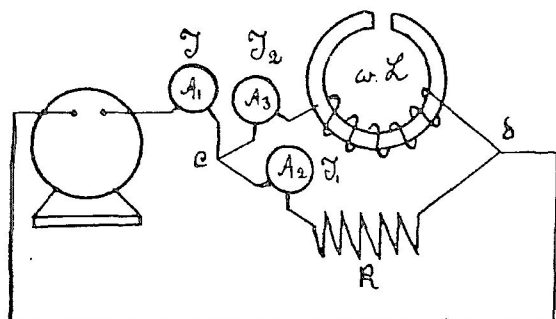
$$P = I \cdot \frac{E^2 - E_1^2 - E_2^2}{2 E_1}$$

А такъ какъ $I = \frac{E_1}{R}$, то

$$P = \frac{E^2 - E_1^2 - E_2^2}{2 R}$$

Способъ трехъ амперметровъ.

Въ томъ случаѣ, когда омическое сопротивленіе R и индуктивное ωL включены въ цѣпь параллельно другъ другу (черт 67), энергія, потребляемая индуктивнымъ сопротивленіемъ, можетъ быть опредѣлена помощью трехъ амперметровъ (черт. 67).



Черт. 67.

Если бы вмѣсто сопротивленія R (черт. 67) было бы включено индуктивное сопротивленіе ωL_1 , т. е. если бы въ цѣпь были вклю-

чены параллельно два индуктивныхъ сопротивленія ωL и ωL_1 , съ омическимъ сопротивленіемъ ихъ обмотокъ r_2 и r_1 , то токи въ развѣтвленіяхъ опредѣлялись бы выраженіями:

$$I_1 = \frac{E}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}} \text{ и } I_2 = \frac{E}{\sqrt{r_2^2 + (\omega L)^2}}$$

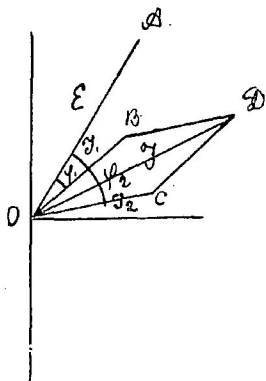
А такъ какъ E разность потенциаловъ между точками $с$ и d (черт. 67)—одна и та же для обоихъ развѣтвленій, то

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\sqrt{r_2^2 + (\omega L)^2}}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}},$$

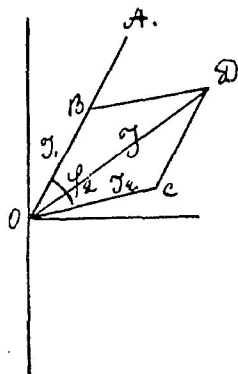
т. е. сила тока въ развѣтвленіяхъ обратно пропорціональна кажущимся сопротивленіямъ.

Въ векторной діаграммѣ (черт. 68) токъ I_1 , отстаетъ отъ напряженія E на уголъ φ_1 , а токъ I_2 —на уголъ φ_2 . Геометри-

ческая сумма этих токов $= I$ представляет собой силу тока, даваемого генераторомъ. Для случая, представленнаго на черт. 67, когда въ одномъ изъ развѣтвленій имѣется только одно омическое сопротивленіе, сила тока въ этомъ развѣтвленіи I_1 совпа-



Черт. 68.



Черт. 69.

дастъ по фазѣ (черт. 69) съ напряженіемъ E . Изъ треугольника ODC имѣемъ:

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + 2 I_1 I_2 \cos \varphi_2.$$

Энергія, потребляемая индуктивнымъ сопротивленіемъ ωL , равняется

$$P = E I_2 \cos \varphi_2.$$

Подставляя вмѣсто $\cos \varphi_2$ его значеніе изъ вышеприведеннаго уравненія и имѣя въ виду, что $E = I_1 R$, имѣемъ

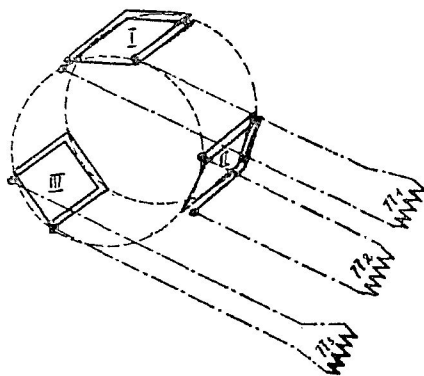
$$P = I_1 R I_2 \cdot \frac{I^2 - I_1^2 - I_2^2}{2 I_1 I_2} = \frac{R}{2} (I^2 - I_1^2 - I_2^2).$$

Трехфазный токъ.

Область примѣненія однофазнаго переменнаго тока до послѣдняго времени, когда появились однофазные коллекторные электродвигатели съ серіею характеристикой, ограничивалась главнымъ образомъ электрическимъ освѣщеніемъ, такъ какъ примѣненіе его къ двигателямъ, которые должны пускаться въ ходъ подъ нагрузкой, встрѣчало существенныя затрудненія, вслѣдствіе необходимости устройства особыхъ приспособленій для пуска въ ходъ этихъ двигателей. Это обстоятельство вызвало появленіе и широкое распространеніе многофазныхъ, главнымъ образомъ

трехфазныхъ токовъ, одинаково пригодныхъ и для электрическаго освѣщенія и для обслуживанія электродвигателей.

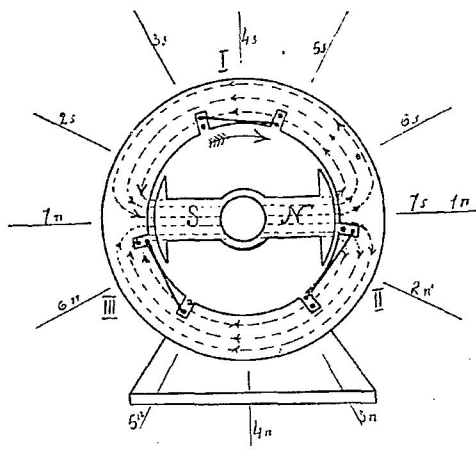
Если въ статорѣ генератора помѣстить три отдѣльныя рамки, расположенныя по внутренней поверхности статора въ разстояніи 120° другъ отъ друга (черт. 70) и привести во вращеніе дву-



Черт. 70.

люсный электромагнитъ (черт. 71), то въ каждой изъ рамокъ за время одного оборота электромагнитовъ будетъ наводиться переменная электродвижущая сила цѣлаго періода, при чемъ время появленія въ рамкахъ одинаковыхъ по величинѣ и по знаку значеній электровозбудительной силы будетъ запаздывать въ каждой слѣдующей рамкѣ по сравненію съ предыдущей на 120° . Въ векторной

діаграммѣ (черт. 72) векторы напряженій въ каждой изъ рамокъ отстоятъ другъ отъ друга на 120° и ихъ проекціи на ось ординатъ даютъ значенія напряженій въ рамкахъ въ каждый разсматриваемый моментъ. Синусоидальныя кривыя напряженій, построенныя при помщи векторной діаграммы, расположены на черт. 72 справа отъ упомянутой діаграммы. Въ положеніи электромагнитовъ $1_n 1_s$ при движеніи ихъ по часовой стрѣлкѣ въ рамкѣ I электродвижущая сила достигаетъ наибольшей положительной величины, считая положительныя направленія по часовой стрѣлкѣ, если смотрѣть на рамку по направленію магнитнаго потока. Въ этотъ моментъ происходитъ измѣненіе числа линий силъ, охватываемыхъ рамкой I, съ наибольшей скоростью (моментъ

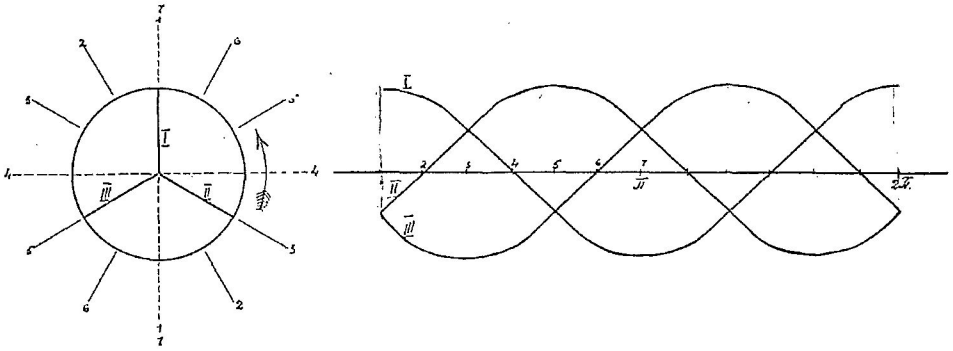


Черт. 71.

измѣненія положительнаго направленія линий на отрицательное). Въ рамкѣ II происходитъ увеличеніе числа линий силъ положительнаго направленія, слѣдовательно, убываетъ — E , въ рамкѣ же III убываетъ число линий силъ отрицательнаго направленія, слѣ-

довательно возрастает E . Положенія электромагнитовъ $1, 1_s, \dots, 7, 7_s$ отвѣчаютъ положеніямъ 1—7 векторной діаграммы и синусоидальныхъ кривыхъ.

При замыканіи рамокъ на какія-либо сопротивленія R_1, R_2, R_3 въ образующихся такимъ образомъ цѣпяхъ будутъ циркулировать переменные токи, которые по фазѣ будутъ отстоять другъ



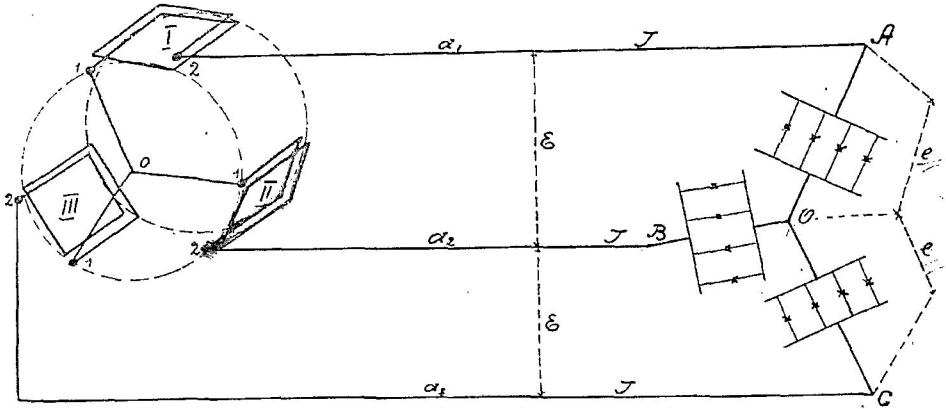
Черт. 72.

отъ друга также на 120° . Для соединенія рамокъ генератора трехъ фазъ съ соответствующими сопротивленіями требуется, такимъ образомъ шесть проводовъ (черт. 70). Однако въ дѣйствительности число проводовъ ограничивается тремя, благодаря возможности, согласно нижеприводимыхъ соображеній, соединять какъ упомянутыя рамки генератора, такъ и сопротивленія, поглощающія энергію трехфазнаго тока,—звѣздой и треугольникомъ.

Соединеніе звѣздой.

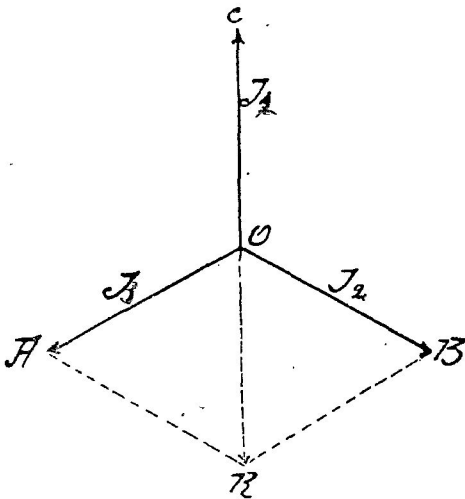
При соединеніи звѣздой соединяются между собою одноименные концы обмотокъ всѣхъ трехъ фазъ, напр. начала рамокъ I, II, III (черт. 73). а концы рамокъ I, II, III приключаются къ линейнымъ проводамъ a_1, a_2, a_3 . Возможность такого соединенія становится ясной изъ разсмотрѣнія векторной діаграммы токовъ въ рамкахъ I, II, III (черт. 74). Въ каждый данный моментъ токъ въ одной изъ рамокъ равенъ суммѣ токовъ въ другихъ двухъ рамкахъ, но съ обратнымъ знакомъ. OR геометрическая сумма векторовъ AO и BO , равна вектору CO и прямо ему противоположна. Слѣдовательно, сколько тока придетъ въ узловое соединеніе или, какъ говорятъ, въ нулевую точку изъ одной рамки, столько же уйдетъ тока изъ этой точки въ двѣ другія рамки или наоборотъ.

Что касается напряженія между линейными проводами $a_1 a_2 a_3$, то оно обуславливается включеніемъ между собою фазныхъ рамокъ. Въ векторной діаграммѣ фазныхъ напряженій (черт. 75) или напряженій, индуктируемыхъ въ рамкахъ I , II и III , векторы

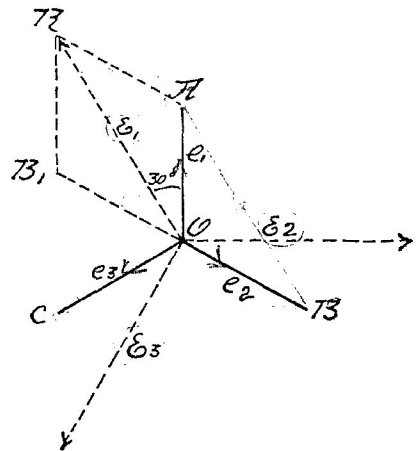


Черт. 73.

напряженій отстоятъ другъ отъ друга на 120° . Между каждой парой линейныхъ проводовъ, т. е. между проводами a_1 и a_2 , a_2 и a_3 , a_3 и a_1 включены соотвѣтственно по двѣ рамки, а именно: $I-II$, $II-III$ и $III-I$, при чемъ эти рамки, будучи соединены между



Черт. 74.



Черт. 75.

собою одноименными концами, дѣйствуютъ на встрѣчу другъ другу и поэтому результирующее напряженіе двухъ рамокъ, являющееся напряженіемъ у борновъ или что тоже напряженіемъ

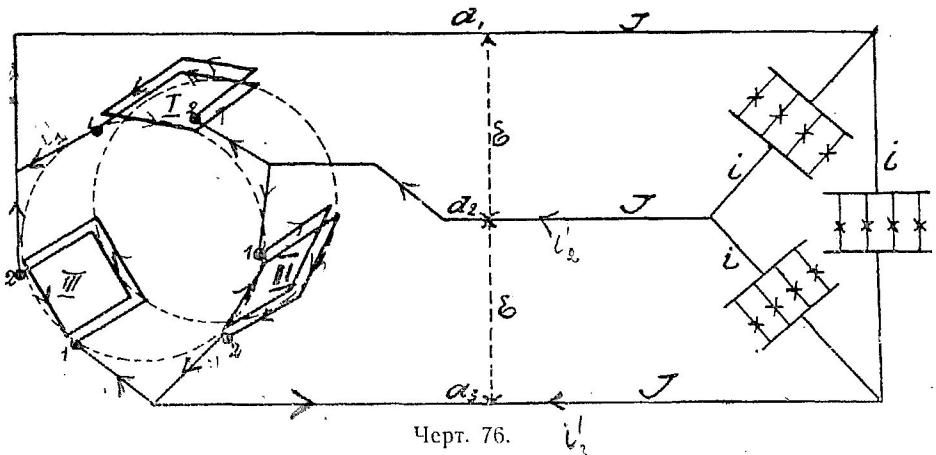
между линейными проводами, получается изъ векторной діаграммы (черт. 75) какъ геометрическая разность между соотвѣствующими векторами. Такъ напр., напряженіе между a_1 и a_2 (черт. 73) есть разность напряженій рамокъ I и II или въ векторной діаграммѣ (черт. 75)—разность между векторами OA и OB .

$$\overline{BA} = \overline{OA} - \overline{OB} = \overline{OA} + \overline{OB}_1 = \overline{OR}.$$

Уголъ $ROA = 30^\circ$. Слѣдовательно $OR = E - OA \sqrt{3} = e \sqrt{3}$, гдѣ E —напряженіе у борновъ генератора, а e —фазное напряженіе рамки одной фазы. Сила тока I въ линейныхъ проводахъ обуславливается напряженіемъ у борновъ генератора E и равна силѣ тока i въ фазныхъ рамкахъ. Источники потребленія тока могутъ включаться въ линейные провода звѣздой или треугольникомъ независимо отъ того, соединены ли фазныя обмотки (рамки) генератора звѣздой или треугольникомъ. На черт. 73 показанъ случай включенія источниковъ потребленія тока (напр., лампъ накаливанія) звѣздой. Сила тока въ каждой группѣ лампъ будетъ равна силѣ тока въ линейномъ проводѣ, т. е. I , а напряженіе у борновъ лампъ, т. е. между точками O и A , O и B , O и C , согласно предыдущему $e = \frac{E}{\sqrt{3}}$.

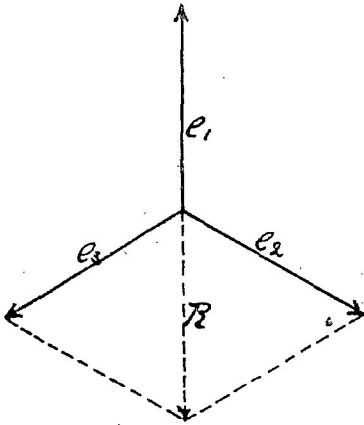
Соединеніе треугольникомъ.

При соединеніи треугольникомъ фазныя обмотки или рамки соединяются между собою послѣдовательно, т. е. конецъ преды-



щей рамки соединяется съ началомъ слѣдующей (черт. 76), и къ этимъ мѣстамъ соединеній приключаются линейные провода a_1 — a_3 .

Изъ векторной діаграммы (черт. 77) видно, что результирующая изъ двухъ фазныхъ напряженій равна и прямо противоположна по знаку напряженію третьей фазы. Вслѣдствіе этого напряженія фазныхъ обмотокъ уравниваются между собою и при разом-



Черт. 77.

кнутой внѣшней цѣпи, несмотря на то, что всѣ три фазныя обмотки образуютъ замкнутую цѣпь, тока въ этихъ обмоткахъ нѣтъ. По отношенію къ внѣшней цѣпи фазныя обмотки включены параллельно. Если во внѣшней цѣпи включены безындуктивныя, т. е. омическія сопротивленія, то токи I въ линейныхъ проводахъ совпадаютъ по фазѣ съ напряженіями E у борновъ генератора, которыя, въ свою очередь, какъ это усматривается изъ чертежа 76, совпадаютъ съ фазными напряженіями— e , такъ какъ фазныя обмотки

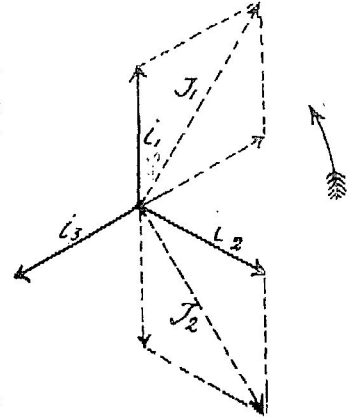
включены непосредственно между линейными проводами. Въ положеніи электромагнитовъ I_n , I_s (черт. 71) въ фазной обмоткѣ I напряженіе достигаетъ наибольшей своей величины e_1 (черт. 72 синус. крив.) и уравнивается суммой напряженій—двухъ другихъ фазъ e_2 и e_3 , каждое изъ которыхъ въ этотъ моментъ равно $\frac{e_1}{2}$. Сообразно съ величиной фазныхъ напряженій токъ въ обмоткѣ

I будетъ наибольшій— i_1 , а въ обмоткахъ II и III въ половину меньшій. Токъ i_1' —положительный (по часовой стрѣлкѣ, если смотрѣть на рамку I изнутри) и поэтому черезъ I_I идетъ въ проводъ a_1 (черт. 76) и возвращается черезъ a_2 . Токъ i_2' — отрицательный выходитъ черезъ 2_{II} , идетъ по проводу a_3 и возвращается по a_2 . Токъ i_3' —отрицательный черезъ 2_{III} идетъ по проводу a_1 и возвращается по проводу a_3 . Такимъ образомъ, въ проводѣ a_1 общая сила тока въ рассматриваемый моментъ равняется $I_1' = i_1' + i_3' = i_{\max} + \frac{i_{\max}}{2} = \frac{3}{2} i_{\max}$, въ проводѣ a_2 токъ $I_2' = i_1' + i_2' = \frac{3}{2} i_{\max}$, въ проводѣ a_3 токъ $I_3 = 0$, такъ какъ токи i_2' и i_3' равны и направлены на встрѣчу другъ другу. Поэтому вышеприведенное распределеніе токовъ надо исправить въ тѣмъ отно-

¹⁾ i_1 i_2 i_3 —наибольшія значенія.

i_1' i_2' i_3' —мгновенныя значенія въ рассматриваемый моментъ.

шеніи, что токъ i_2 изъ рамки II выходитъ черезъ 2_{1p} идетъ затѣмъ къ 1_{III} и черезъ рамку III выходитъ въ проводъ a_1 . Въ векторной діаграммѣ токовъ (черт. 78) результирующая токовъ двухъ смежныхъ фазныхъ обмотокъ генератора опредѣляется какъ геометрическая разность векторовъ фазныхъ токовъ, такъ какъ между собою соединены не одноименные концы фазныхъ обмотокъ, а разноименные, т. е. конецъ одной съ началомъ другой. Положеніе векторовъ на черт. 78 отвѣчаетъ разобранному выше случаю, т. е. проекція на вертикаль I_1 равняется



Черт. 78.

3
2 $i_{\max}$. При поворотѣ электромагнитовъ на 30° (положеніе $2_n 2_s$ на черт. 71), напряжение въ обмоткѣ II равно нулю, а въ обмоткахъ I и III равно

$$e_{\max} \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Соотвѣственно и токи въ нихъ $i_2' = 0$, $i_1' = i_3' = i_{\max} \frac{\sqrt{3}}{2}$.

Токи изъ обмотокъ I и III направляются въ проводъ a_1 , а по приводамъ a_2 и a_3 возвращаются въ соотвѣтствующія обмотки.

Такимъ образомъ, сила тока I_1 въ проводѣ a_1 равняется суммѣ токовъ i_1' и i_3' , т. е. $2 \cdot i_{\max} \frac{\sqrt{3}}{2} = i_{\max} \sqrt{3} = I_1$.

На діаграммѣ 78 это отвѣчаетъ моменту, когда результирующій векторъ I_1 совпадаетъ съ вертикалью, т. е. когда токъ въ линейномъ проводѣ достигаетъ своего наибольшаго значенія. Такимъ образомъ, при соединеніи треугольникомъ напряжение между линейными проводами или, что то же, напряжение у борновъ генератора равно фазному напряженію $E = e$, а наибольшая сила тока въ линейномъ проводѣ въ $\sqrt{3}$ раза больше наибольшей фазной силы тока: $I_{\max} = i_{\max} \sqrt{3}$. То же соотношеніе дѣйствительно и для эффектныхъ значеній, т. е. $I = i \sqrt{3}$. При соединеніи же звѣздой $E_{\max} = e_{\max} \sqrt{3}$, $E = e \sqrt{3}$, а $I = i$. На черт. 76 приведенъ случай включенія треугольникомъ источниковъ потребленія энергіи, напр., лампъ накаливанія. Согласно вышеизложеннаго, сила тока i въ каждой группѣ лампъ $= \frac{I}{\sqrt{3}}$, а напряженіе у борновъ лампъ $= E$.

Энергія въ цѣпи трехфазнаго тока.

Въ случаѣ включенія источниковъ потребления тока звѣздой (черт. 73), энергія, отдаваемая генераторомъ, равна суммѣ энергій, потребляемой каждой изъ трехъ группъ источниковъ потребления, т. е.

$$P = 3 \cdot e I \cos \varphi.$$

А такъ какъ

$$e = \frac{E}{\sqrt{3}},$$

то

$$P = \sqrt{3} E I \cos \varphi.$$

Въ случаѣ включенія источниковъ потребления тока — треугольникомъ

$$P = 3 E i \cos \varphi,$$

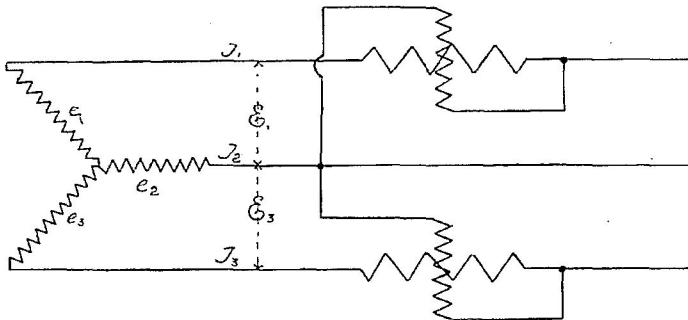
или, такъ какъ

$$i = \frac{I}{\sqrt{3}},$$

$$P = \sqrt{3} E I \cos \varphi$$

т. е. то же, что и въ первомъ случаѣ.

При измѣреніи энергіи въ цѣпи трехфазнаго тока, когда фазы нагружены неравномѣрно, приходится измѣрять нагрузки отдѣльныхъ фазъ и затѣмъ ихъ суммировать. На черт. 79 обмотка



Черт. 79.

генератора включена звѣздой. Фазныя напряженія $e_1 e_2 e_3$; сила тока въ обмоткахъ та же, что и въ линейныхъ проводахъ, т. е. $I_1 I_2 I_3$. Нагрузка фазъ предполагается для простоты омическая т. е.

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0.$$

$$P = e'_1 I_1 + e'_2 I_2 + e'_3 I_3.$$

Согласно предыдущему

$$I'_1 + I'_2 + I'_3 = 0$$

откуда

$$I'_2 = -(I'_1 + I'_3).$$

Подставляем значение I'_2 въ выраженіе для P

$$P = e'_1 I'_1 - e'_2 (I'_1 + I'_3) + e'_3 I'_3.$$

или

$$P = (e'_1 - e'_2) I'_1 + (e'_3 - e'_2) I'_3.$$

Такъ какъ

$$e'_1 - e'_2 = E'_1, \text{ а } e'_3 - e'_2 = E'_3,$$

то

$$P = E'_1 I'_1 + E'_3 I'_3.$$

Такимъ образомъ, для измѣренія энергіи трехфазнаго тока при неравномѣрной нагрузкѣ достаточно двухъ однофазныхъ ваттметровъ, сумма показаній которыхъ даетъ полную энергію трехфазнаго тока. Такъ какъ благодаря инерціи подвижныхъ частей ваттметра, послѣдній показываетъ среднее значеніе изъ мгновенныхъ значеній, то

$$P = E_1 I_1 + E_3 I_3,$$

гдѣ $E_1 I_1 E_3 I_3$ эффективныя значенія токовъ и напряженій.

На черт. 70, 73, и 76 для простоты двуполюсный генераторъ изображенъ съ тремя рамками. Въ дѣйствительности же число рамокъ каждой фазы обыкновенно отвѣчаетъ числу полюсовъ, т. е. при двуполюсномъ генераторѣ должно быть 6 рамокъ. Добавочная рамка каждой фазы располагается напротивъ основной и соединяется съ ней послѣдовательно, такъ что напряженія въ двухъ рамкахъ одной фазы суммируются.

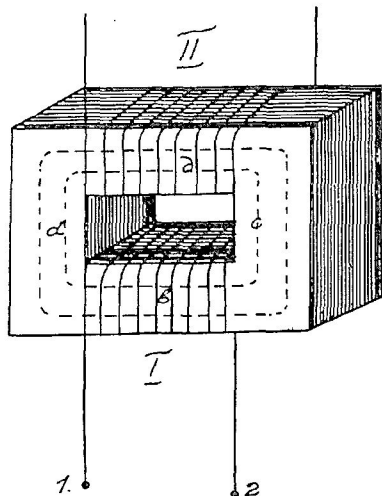
Генераторы трехфазнаго тока нормально строятся какъ и однофазные, — многополюсными, при чемъ въ новѣйшихъ типахъ вращающейся частью являются электромагниты, а фазныя обмотки неподвижны.

Трансформаторъ.

При передачѣ электрической энергіи по проводамъ на большія разстоянія потери ея, обусловливаемыя нагрѣваніемъ проводовъ и опредѣляемыя по закону Джауля выраженіемъ $I^2 R$, гдѣ R — сопротивление проводовъ, могутъ при извѣстныхъ условіяхъ достигать значительной величины. Поэтому уменьшеніе этихъ потерь до возможнаго минимума является основной задачей проектированія передачъ энергіи на большія разстоянія. При данномъ сопротивленіи проводовъ, зависящемъ отъ ихъ длины и сѣченія, потери будутъ тѣмъ меньше, чѣмъ меньше сила тока I . А такъ какъ энергія выражается произведеніемъ силы тока на напряженіе EI , то для сохраненія количества передаваемой энергіи при уменьшеніи силы тока, должно быть повышено соотвѣтственно напряженіе, при которомъ должна производиться передача энергіи. Потребность передавать очень большія количества энергіи на разстоянія, измѣряемыя сотнями верстъ (200—300), привела къ примѣненію напряженій, достигающихъ въ настоящее время 100.000 вольтъ и даже болѣе. Столь высокія напряженія не могутъ быть получены непосредственно отъ генераторовъ, вслѣдствіе конструктивныхъ трудностей. Поэтому для полученія высокихъ напряженій примѣняются особые приборы, носящіе названіе трансформаторовъ и преобразующіе токъ большой силы, но малаго напряженія, въ токъ малой силы, но высокаго напряженія, а также наоборотъ. На черт. 80 изображенъ схематически однофазный трансформаторъ. Онъ состоитъ: 1) изъ желѣзнаго сердечника A , образованнаго желѣзными листами съ бумажной прокладкой между ними для устраненія токовъ Фуко, при чемъ сердечникъ представляетъ собою замкнутую магнитную цѣпь, 2) изъ первичной обмотки I , образуемой толстой мѣдной изолированной проволокой, навитой съ малымъ числомъ оборотовъ на желѣзный сердечникъ A , и 3) изъ вторичной обмотки II , состоящей изъ большого количества витковъ тонкой изолированной прово-

локи, также навитой на желѣзный сердечникъ, при чемъ обмотки *I* и *II* или располагаются рядомъ или насаживаются другъ на друга концентрически.

Если черезъ первичную обмотку пропускать переменный однофазный синусоидальный токъ, то въ желѣзномъ сердечникѣ появится переменный магнитный потокъ, который будетъ слѣдовать за измѣненіемъ силы тока въ обмоткѣ *I* по величинѣ и направленію. Такъ въ теченіе перваго полуперіода, когда токъ идетъ отъ борна 1 къ борну 2, магнитный потокъ имѣетъ направленіе линій силъ *adcb*, при второмъ полуперіодѣ токъ идетъ отъ борна 2 къ борну 1, соотвѣтственно линіи силъ въ сердечникѣ получаютъ направленіе *abcd*. Такъ какъ токъ синусоидальный, то и магнитный потокъ измѣняется по закону синуса, т. е.



Черт. 80.

$$N' = N \sin \alpha = N \sin (\omega t).$$

Вслѣдствіе измѣненія числа линій силъ въ сердечникѣ, въ обмоткахъ *I* и *II* наводятся электродвижущія силы, согласно уравненія $E' = - \frac{dN'}{dt}$.

Въ одномъ виткѣ будетъ наводиться электродвижущая сила, равная $-\frac{dN'}{dt} = N \omega \cos \alpha 10^{-8}$, а при *n* послѣдовательно включенныхъ виткахъ:

$$E' = N \omega n \cos \alpha 10^{-8}.$$

Наибольшее значеніе $E_{\max} = N \omega n 10^{-8}$, откуда эффективное значеніе электровозбудительной силы получается путемъ дѣленія на $\sqrt{2}$:

$$E = \frac{N \omega n 10^{-8}}{\sqrt{2}} = \frac{N \cdot 2\pi \cdot n 10^{-8}}{\sqrt{2}} = N 4,44 n 10^{-8}.$$

Если въ обмоткѣ *I* имѣется n_1 витковъ, въ обмоткѣ *II* — n_2 витковъ, то въ обмоткѣ *I* будетъ индуцироваться $E_1 = 4,44 N n_1 10^{-8}$, а въ обмоткѣ *II* $E_2 = 4,44 N n_2 10^{-8}$.

Въ томъ случаѣ, когда вторичная обмотка не замкнута на какое-либо сопротивление, т. е. трансформаторъ не нагруженъ,

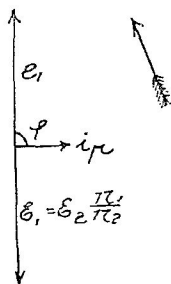
первичная обмотка представляет собой обыкновенную катушку самоиндукции, а индуцируемая въ ней электродвижущая сила E_1 является электродвижущей силой самоиндукции, которая почти равна и прямо противоположна напряженію e_1 у борновъ обмотки I и пропускаетъ въ обмотку лишь столько тока, сколько нужно для образованія магнитнаго потока.

E_2 — электродвижущая сила, наводимая во вторичной обмоткѣ совпадаетъ по фазѣ съ E_1 и при отсутствіи нагрузки во вторичной цѣпи равна e_2 — напряженіе у борновъ катушки II. Пренебрегая омической потерей напряженія въ первичной катушкѣ, получаемъ соотношеніе:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{e_2}{e_1} = \frac{n_2}{n_1},$$

т. е., при холостомъ ходѣ трансформатора напряженіе у борновъ въ обѣихъ омоткахъ относятся, какъ число витковъ этихъ обмотокъ.

Магнитный потокъ въ сердечникѣ трансформатора совпадаетъ по фазѣ съ магнитизирующимъ токомъ. Индуцируемая же напряженія въ обмоткахъ трансформатора отстаютъ отъ магнитнаго потока по фазѣ на 90° , такъ какъ изъ выраженія $E' = -\frac{dN'}{dt}$ слѣдуетъ, что $\frac{1}{2} E_{\max}$



Черт. 81.

наступаетъ въ тотъ моментъ, когда синусоидальная кривая магнитнаго потока переходитъ черезъ ось абсциссъ изъ $+$ въ $-$. Такимъ образомъ, если въ векторной діаграммѣ (черт. 81) магнитизирующий токъ $i\phi$ отложить по оси абсциссъ направо, то E_1 и E_2 будутъ направлены внизъ подъ угломъ 90° къ $i\phi$, первичное же напряженіе у борновъ e_1 , какъ прямо противоположное E_1 , будетъ направлено вверхъ подъ угломъ 90° къ $i\phi$. На основаніи уравненія.

$$E_1 = E_2 \frac{n_1}{n_2}$$

слѣдуетъ, что векторъ E_1 представляетъ собой непосредственно векторъ E_2 , но въ масштабѣ въ $\frac{n_1}{n_2}$ большемъ, чѣмъ для E_1 , и поэтому при построеніи векторной діаграммы напряженія вторичной цѣпи должны быть приводимы къ соотвѣтствующимъ условіямъ первичной цѣпи путемъ умноженія на $\frac{n_1}{n_2}$.

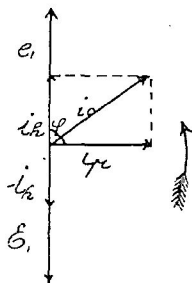
Потребляемая въ цѣпи переменнаго однофазнаго тока энергія выражается, согласно предыдущаго,

$$P = e i \cos \varphi.$$

Такъ какъ при холостомъ ходѣ трансформатора, согласно векторной діаграммы (черт. 81) $\varphi = 90^\circ$, то $P = 0$.

Между тѣмъ, въ дѣйствительности, если въ первичную цѣпь трансформатора включить ваттметръ, то онъ покажетъ нѣкоторую величину P_h . Измѣренная ваттметромъ энергія расходуется на перемагничиваніе желѣзнаго сердечника трансформатора при каждомъ измѣненіи направленія тока въ первичной обмоткѣ и обусловливается явленіемъ гистерезиса. Такимъ образомъ, токъ въ первичной обмоткѣ при холостомъ ходѣ отстаетъ по фазѣ отъ напряженія у борновъ не на 90° , а на уголъ φ , меньшій 90° .

$$\cos \varphi = \frac{P_h}{e_1 i_0}.$$



Черт. 82.

Этотъ токъ можетъ быть разложенъ (черт. 82) на токъ i_μ , не вызывающій работы, а идущій на намагничиваніе желѣзнаго сердечника, и на токъ i_h , совпадающій по фазѣ съ e_1 и идущій на преодоленіе размагничивающаго дѣйствія гистерезиса ($-i_h$).

Трансформаторъ при безындуктивной нагрузкѣ.

Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть на омическое сопротивленіе, т. е. нагрузить трансформаторъ безындуктивной нагрузкой, то энергія $e_1 i_1$, отдаваемая генераторомъ трансформатору, будетъ расходоваться: 1) на энергію, поглощаемую во вторичной внѣшней цѣпи и идущую на полезную работу — $e_2 i_2$, 2) на нагреваніе первичной обмотки трансформатора $i_1^2 r_1$, 3) на нагреваніе вторичной обмотки — $i_2^2 r_2$ и 4) на работу перемагничивания сердечника трансформатора — P_h

$$e_1 i_1 = e_2 i_2 + i_1^2 r_1 + i_2^2 r_2 + P_h.$$

Послѣдніе три члена уравненія представляютъ собою потери въ трансформаторѣ. Такъ какъ эти потери малы—1—2% отъ мощности трансформатора, то пренебрегая ими, получаемъ съ достаточной точностью соотношеніе

$$e_1 i_1 = e_2 i_2,$$

откуда

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{e_2}{e_1} = \frac{n_2}{n_1},$$

т. е. что сила тока въ первичной и вторичной обмоткахъ обратно пропорціональна числу витковъ. Токъ i_2 во вторичной цѣпи при безындуктивной нагрузкѣ совпадаетъ по фазѣ съ напряженіемъ E_2 , индуцируемымъ во вторичной обмоткѣ. Токъ i_1 въ первичной цѣпи совпадаетъ по фазѣ съ напряженіемъ у борновъ генератора или, что то же, съ напряженіемъ у первичныхъ борновъ трансформатора, т. е. съ e_1 . Такъ какъ согласно векторной діаграммы (черт. 81) e_1 и E_2 отстоятъ по фазѣ другъ отъ друга на 180° , то и i_1 и i_2 также разнятся по фазѣ на 180° , т. е. дѣйствуютъ на магнитный потокъ въ сердечникѣ трансформатора, при одномъ и томъ же направленіи витковъ, прямо противоположно другъ другу.

Усиленіе тока во вторичной цѣпи вызываетъ на мгновеніе уменьшеніе величины магнитнаго потока N , вслѣдствіе чего понижается E_1 . Благодаря увеличенію разности $e_1 - E_1$ усиливается токъ въ первичной цѣпи и возстанавливается нарушенное равновѣсіе. Такимъ образомъ, увеличеніе тока во вторичной цѣпи вызываетъ соотвѣтствующее увеличеніе тока въ первичной цѣпи, а уменьшеніе тока во вторичной цѣпи соотвѣтствующее уменьшеніе тока въ первичной. Амперъ-витки $i_1 n_1$ и $i_2 n_2$ первичной и вторичной обмотокъ, дѣйствуя взаимно противоположно, даютъ составляющую нѣкоторое количество амперъ-витковъ, которое обуславливаетъ наличіе въ сердечникѣ трансформатора опредѣленнаго магнитнаго потока. Наибольшее его значеніе, согласно предыдущему, опредѣляется изъ выраженія

$$N = \frac{E_1 10^8}{4,44 \simeq n_1}.$$

Въ виду незначительности омическаго паденія напряженія въ первичной обмоткѣ можно принять $E_1 = e_1$ и, слѣдовательно,

$$N = \frac{e_1 10^8}{4,44 \simeq n_1}.$$

Такъ всѣ члены второй половины равенства постоянны, то и N постоянно. Амперъ-витки $n_1 i_0$, возбуждающіе магнитный потокъ при холостомъ ходѣ трансформатора, въ виду постоянства N , должны быть въ отношеніи ихъ дѣйствія на N постоянными также и при различныхъ нагрузкахъ трансформатора. Отсюда слѣдуетъ, что $i_0 n_1$ и есть составляющая $i_1 n_1$ и $i_2 n_2$. Раздѣляя всѣ амперъ-

Векторъ $\frac{i_2 n_2}{n_1}$ даетъ непосредственное значеніе силы тока во вто-

ричной цѣпи, но въ масштабѣ въ $\frac{n_2}{n_1}$ уменьшемъ, чѣмъ i_1 . Построение векторной диаграммы трансформатора (черт. 83) на основаніи вышеизложеннаго не представляетъ затрудненій. Зная силу тока i_0 при холостомъ ходѣ, потребляемую при этомъ ходѣ энергію P_h и напряженіе у борновъ въ первичной цѣпи e_1 , можно опредѣлить уголъ φ составляемый векторомъ тока i_0 съ напряженіемъ у борновъ e_1 при холостомъ ходѣ, а именно:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_h}{e_1 i_0} \quad .$$

Затѣмъ опредѣляемъ i_n и i_m :

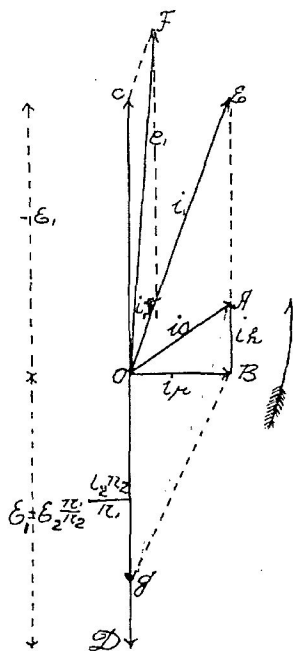
$$i_b = i_0 \cos \varphi_0$$

$$i_y = \sqrt{i_0^2 - i_h^2}.$$

Строимъ треугольникъ OAB изъ векторовъ токовъ i_0 , i_h , i_μ . Въ тотъ моментъ, когда векторъ i_μ совпадаетъ съ осью абсциссъ, векторы E_1 и E_2 электродвижущихъ силъ, наводимыхъ въ первичной и вторичной обмоткахъ и отстающихъ отъ вектора i_μ на 90° , направлены внизъ по оси ординатъ.

$$OD = E_1 = E_2 \frac{n_1}{n_2}.$$

При безындуктивной нагрузкѣ токъ во вторичной цѣпи совпадаетъ по фазѣ съ индуцируемымъ напряженіемъ E_2 . Откладывая векторъ $\frac{i_2 n_2}{n_1}$ въ подходящемъ масштабѣ по направленію OD и имѣя въ виду, что векторъ i_0 есть геометрическая сумма изъ i_1 и $\frac{i_2 n_2}{n_1}$, строимъ параллелограмъ $OEAG$, коего стороны $OE = i_1$. Такъ какъ омическое паденіе напряженія въ первичной обмоткѣ трансформатора совпадаетъ по фазѣ съ первичнымъ токомъ i_1 , то векторъ этого напряженія $i_1 r_1$ (r_1 —омическое сопро-



Черт. 83.

тивление первичной обмотки) откладываемъ по направлению OE . $OC = -E_1$ представляет собою составляющую напряженія e_1 , идущую на преодоленіе индуцируемаго въ первичной обмоткѣ напряженія E_1 . OF — геометрическая сумма изъ E_1 и $i_1 r_1$, т. е. напряжение у первичныхъ борновъ e_1 .

Трансформаторъ при индуктивной нагрузкѣ.

Въ томъ случаѣ, когда вторичная цѣпь трансформатора замкнута на омическое сопротивление R_2 и индуктивное сопротивление $L_2 \omega$, токъ во вторичной цѣпи отстаетъ отъ напряженія у вторичныхъ борновъ на уголъ φ_2 , который опредѣляется изъ уравненія

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = -\frac{L_2 \omega}{R_2}.$$

Уголъ φ сдвига фазъ между токомъ i_2 и индуцируемымъ во вторичной цѣпи напряженіемъ E_2 опредѣляется изъ уравненія

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L_2 \omega}{R_2 + r_2}, \text{ гдѣ } r_2 \text{ омическое сопротивление вторичной обмотки трансформатора.}$$

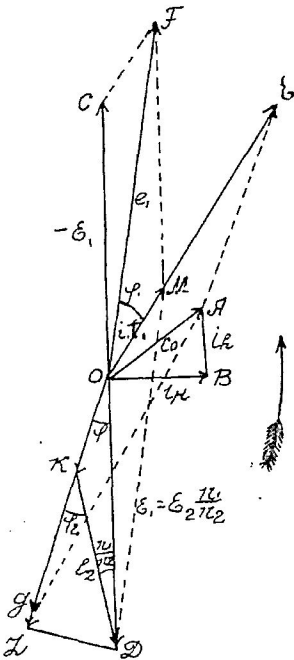
Построеніе векторной диаграммы ведется согласно предыдущаго. Строится (черт. 84) треугольникъ OAB изъ векторовъ i_0 , i_h и i_u и перпендикулярно къ вектору i_u откладывается внизъ векторъ

$$OD = E_1 = E_2 \frac{n_1}{n_2}.$$

Векторъ тока во вторичной цѣпи i_2 , какъ отстающій отъ вектора E_2 на уголъ φ , откладывается подъ этимъ угломъ къ вектору $E_2 \frac{n_1}{n_2}$, т. е. по

$$\text{направленію } OL, \text{ при чемъ } OG = \frac{i_2 n_2}{n_1}.$$

Векторъ тока i_1 въ первичной цѣпи получается по величинѣ и по фазѣ путемъ построения параллелограмма $OEAG$ и равенъ OE . Омическая потеря напряженія во вторичной цѣпи совпадаетъ по фазѣ съ токомъ i_2 . OK векторъ этого напря-



Черт. 84.

женія, равный $i_2 r_2 \frac{n_1}{n_2}$. DK — геометрическая разность $E_2 \frac{n_1}{n_2}$ и

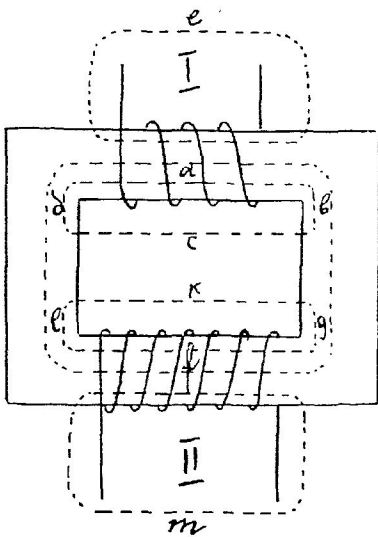
$i_2 r_2 \frac{n_1}{n_2}$, т. е. напряжение у борновъ вторичной обмотки трансформатора, выражаемое векторомъ $e_2 \frac{n_1}{n_2}$. LK —векторъ омическаго паденія напряжения во внѣшней цѣпи, т. е. полезнаго (рабочаго) напряжения $i_2 R_2 \frac{n_1}{n_2}$. LD —векторъ электровозбудительной силы самоиндукціи во внѣшней цѣпи $i_2 L_2 \omega \frac{n_1}{n_2}$.

Треугольникъ KDL даетъ извѣстную зависимость между напряженіемъ у борновъ, омическимъ паденіемъ напряжения и электровозбудительной силой самоиндукціи: $e_2^2 = (i_2 R_2)^2 + (i_2 L_2 \omega)^2$. $OF = e_1$ геометрическая сумма составляющей первичнаго напряжения E_1 и омическаго паденія напряжения въ первичной обмоткѣ трансформатора $i_1 r_1$.

Слѣдуетъ имѣть въ виду, что величина i_0 по сравненію съ i_1 и i_2 очень мала. Съ уменьшеніемъ же i_0 , фаза между векторами i_1 и $\frac{i_2 n_2}{n_1}$ приближается къ 180° , т. е. линія GE практически прямая. Съ другой стороны омическія потери въ обмоткахъ первичной и вторичной очень малы по сравненію съ напряженіемъ у борновъ и потому векторы послѣднихъ e_1 и $\frac{e_2 n_1}{n_2}$ при разсмотрѣнномъ положеніи векторовъ почти совпадаютъ съ осью ординатъ. При этомъ практически $\varphi_2 = \varphi = \varphi_1$, т. е. сдвигъ фазы тока во вторичной цѣпи вызываетъ такой же сдвигъ фазы тока i_2 въ первичной цѣпи. Линія $DM = OF = e_1$. Треугольникъ $LM D$ представляетъ собою упрощенную діаграмму трансформатора, которая показываетъ, что вычитая изъ первичнаго напряжения $e_1 = DM$ омическія потери напряжения въ обѣихъ обмоткахъ трансформатора $i_1 r_1 + i_2 r_2 \frac{n_1}{n_2} = KM$, получаемъ напряжение у борновъ во вторичной цѣпи $e_2 \frac{n_1}{n_2} = KD$, которое, въ свою очередь, расходуется на преодоленіе электровозбудительной силы самоиндукціи во вторичной цѣпи $LD = i_2 L_2 \omega \frac{n_1}{n_2}$ и омическую потерю напряжения въ той же цѣпи $i_1 \frac{R n_1}{n_2}$.

Разсѣиваніе линій силъ въ трансформаторѣ.

При построении вышеприведенныхъ діаграммъ предполагалось, что магнитный потокъ въ сердечникѣ трансформатора проходитъ полностью какъ черезъ первичную, такъ и черезъ вторичную обмотки. Въ дѣйствительности же, такъ какъ токи въ обѣихъ обмоткахъ практически разнятся по фазѣ на 180° , то возбуждаемые ими магнитодвижущія силы $0,4\pi n_1 i_1$ и $0,4\pi n_2 i_2$ дѣйствуютъ на встрѣчу другъ другу, вслѣдствіе чего не всѣ линіи силъ, возбуждаемая первичнымъ токомъ, пройдутъ черезъ вторичную обмотку, а часть изъ нихъ, встрѣчая магнитное противодѣйствіе вторичной катушки, выберетъ себѣ путь черезъ воздухъ по направлению *abcd*, *aca* (черт. 85). Такъ какъ первичный и вторичный токи по фазѣ разнятся на уголъ нѣсколько меньшій 180° , то въ теченіе каждаго періода будетъ моментъ, хотя и весьма незначительный, въ теченіе котораго сила вторичныхъ амперъ-витковъ $i_2 n_2$ будетъ больше $i_1 n_1$, а вслѣдствіе этого вторичныя амперъ-витки вызовутъ нѣкоторый силовой потокъ, хотя и очень малый, который, встрѣчая магнитное противодѣйствіе первичной катушки, также направится черезъ воздухъ по пути *fgkl* и *fmf*. Линіи силъ, появляющіяся и исчезающія только въ одной какой-либо катушкѣ, наводятъ въ ней электродвижущую силу самоиндукціи, отстающую по фазѣ отъ линіи силъ,



Черт. 85.

а, слѣдовательно, и отъ тока ихъ возбуждающаго на 90° . По этому если въ векторной діаграммѣ (черт. 86), принимая во вниманіе, что 1) векторы токовъ i_1 и i_2 практически составляютъ прямую линію, 2) $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$ и 3) e_2 почти совпадаетъ по фазѣ съ E_2 , провести линію векторовъ токовъ подъ угломъ φ_2 , опредѣляемымъ совокупностью омическаго и индуктивнаго сопротивленій во вторичной цѣпи, къ линіи векторовъ напряженія E_1 E_2 , то омическія паденія напряженія въ первичной и вторичной обмоткахъ трансформатора, какъ совпадающія по фазѣ съ векторами токовъ, выразятся векторами *OG* и *OL*. Электродвижущія силы самоиндукціи, вызываемыя въ первичной и вторич-

ной обмотках вышеупомянутыми линиями силъ разсѣиванія, будутъ отставать по фазѣ отъ токовъ, вызывающихъ появленіе упомянутыхъ линій силъ, на 90° , а составляющая OP первичнаго напряженія у борновъ e_1 и составляющая ON электродвижущей силы E_2 , индуцируемой во вторичной обмоткѣ, идущія на преодоленіе этихъ электродвижущихъ силъ самоиндукціи, будутъ опережать соотвѣтствующие токи на 90° . Такимъ образомъ векторъ OQ представляетъ собою составляющую первичнаго напряженія e_1 , идущую на преодоленіе омическаго сопротивленія и электродвижущей силы самоиндукціи первичной обмотки трансформатора. OR — составляющая напряженія E_2 , идущая на преодоленіе омическаго сопротивленія и электродвижущей силы самоиндукціи во вторичной обмоткѣ трансформатора.

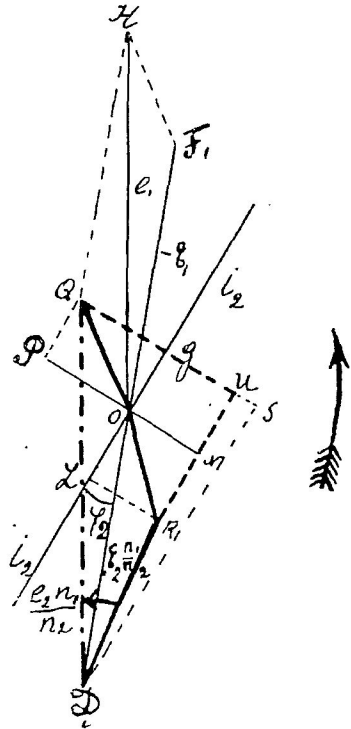
Векторъ $OH = e_1$ получается какъ геометрическая сумма изъ вектора OQ и $OF = -E_1$.

Векторъ DR получается какъ геометрическая разность изъ вектора $OD = \frac{E_2 n_1}{n_2}$ и вектора OR .

Векторы GO , OP , OL и ON для ясности діаграммы приведены въ значительно преувеличенномъ размѣрѣ по сравненію съ векторами OH и DR . Въ дѣйствительности же они по сравненію съ векторами OH и DR очень малы и практически линія QOR представляется прямой.

Въ прямоугольномъ треугольникѣ QUR гипотенуза QR представляетъ собою геометрическую сумму омическихъ потерь напряженія и электродвижущихъ силъ самоиндукціи въ обѣихъ обмоткахъ трансформатора.

Такъ какъ $DQ = OH = e_1$, то изъ треугольника DQR слѣдуетъ, что напряженіе у борновъ вторичной обмотки $e_2 \frac{n_1}{n_2}$ (DR) есть геометрическая разность первичнаго напряженія e_1 (DQ) и внутреннихъ потерь напряженія въ обѣихъ обмоткахъ трансформатора (QR).



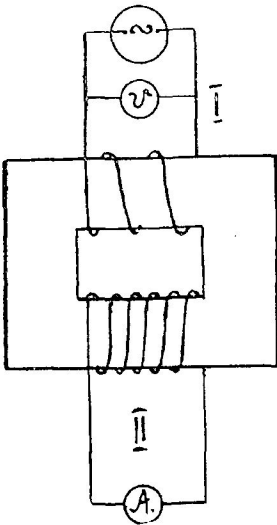
Черт. 86.

Эти потери опредѣляются непосредственно опытомъ. Для этой цѣли вторичная обмотка замыкается на короткую черезъ амперметръ (черт. 87). Первичная же обмотка приключается къ источнику переменнаго тока, напряженіе котораго можетъ регулироваться въ желаемыхъ предѣлахъ. Напряженіе это регулируется на такое его значеніе, при которомъ токъ во вторичной цѣпи достигаетъ величины тока при нормальной работѣ трансформатора. Такъ какъ вторичная обмотка замкнута на короткую, то напряженіе у борновъ этой обмотки $= 0$ и векторъ DR (черт. 86) также обращается въ 0. При этомъ векторъ DQ сливается съ векторомъ QR . Отсюда слѣдуетъ, что напряженіе въ первичной цѣпи, измѣряемое вольтметромъ V , идетъ цѣликомъ на преодоленіе внутреннихъ потерь напряженія въ обѣихъ обмоткахъ. Зная величину омическихъ сопротивленій обѣихъ обмотокъ и

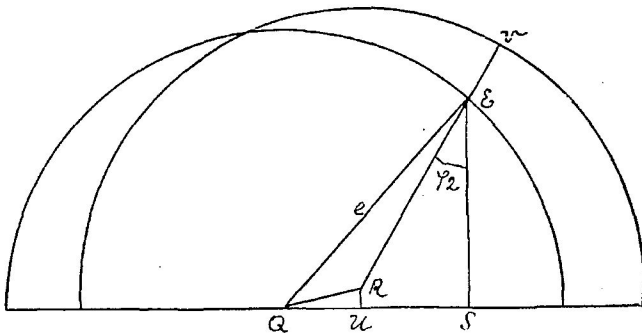
силу тока въ нихъ $i_1 i_2$, путемъ вычисленія опредѣляются омическія потери напряженія и, слѣдовательно, векторъ $LG = i_1 r_1 + i_2 r_2 \frac{n_1}{n_2}$.

По векторамъ QR и $RU = LG$ строится треугольникъ QRU .

Съ помощью треугольника QRU можно заранѣе опредѣлить напряженіе у вторичныхъ борновъ трансформатора при данной



Черт. 87.



Черт. 88.

силѣ тока i_2 и любомъ значеніи φ_2 , т. е. при любой индуктивной нагрузкѣ во вторичной цѣпи. Для этого (черт. 88) строится треугольникъ QRU и изъ вершины Q и R описываются полуокружности радіусомъ $QE = e_1$. Векторъ RE даетъ значеніе въ соотвѣт-

ствующемъ масштабѣ для e_2 при углѣ φ_2 , составляемомъ векторомъ RE съ вертикалью. Векторъ EV — паденіе напряженія во вторичной обмоткѣ при нагрузкѣ, по сравненію съ напряженіемъ при холостомъ ходѣ трансформатора.

Коэффициентъ полезнаго дѣйствія трансформатора опредѣляется соотношеніемъ энергіи, отдаваемой трансформаторомъ, къ энергіи, поглощаемой имъ, т. е. $\eta = \frac{e_2 i_2}{e_1 i_1}$.

Такъ какъ непосредственное измѣреніе энергіи въ цѣпи высокаго напряженія встрѣчаетъ техническія трудности, то $e_2 i_2$ замѣняемъ черезъ

$$e_2 i_2 = e_1 i_1 - i_1^2 r_1 - i_2^2 r_2 - P_h,$$

гдѣ $e_2 i_2$ — энергія, отдаваемая трансформаторомъ,

$i_1^2 r_1$ — энергія, идущая на нагрѣваніе первичной обмотки,

$i_2^2 r_2$ — то же — вторичной обмотки,

P_h — энергія, расходуемая на перемагничиваніе желѣзнаго сердечника.

$$\eta = \frac{e_1 i_1 - i_1^2 r_1 - i_2^2 r_2 - P_h}{e_1 i_1}.$$

Величина $e_1 i_1$ и P_h измѣряются помощью ваттметра со стороны низкаго напряженія, при чемъ $e_1 i_1$ при нагрузкѣ i_1 , а P_h при холостомъ ходѣ трансформатора. Сумма $i_1^2 r_1 + i_2^2 r_2$ измѣряется ваттметромъ, включаемымъ со стороны обмотки высокаго напряженія, при замкнутой на короткую обмоткѣ низкаго напряженія, при чемъ, когда сила тока въ коротко замкнутой обмоткѣ будетъ установлена i_2 , показаніе ваттметра даетъ искомую величину потери энергіи, идущей на нагрѣваніе первичной и вторичной обмотокъ трансформатора, какъ какъ измѣряемая въ этомъ случаѣ ваттметромъ энергія равняется (см. черт. 86)

$$\begin{aligned} QR \cos \angle QRU \cdot i_1 &= RU \cdot i = \left(i_1 r_1 + i_2 r_2 \frac{n_1}{n_2} \right) i_1 = i_1^2 r_1 + \\ &+ i_2 r_2 \frac{n_1}{n_2} \cdot i_2 \frac{n_2}{n_1} = i_1^2 r_1 + i_2^2 r_2. \end{aligned}$$

Соотношеніе между потерями въ трансформаторѣ, а именно между P_h и $(i_1^2 r_1 + i_2^2 r_2)$, обуславливается при проектированіи трансформатора условіями его будущей работы. Трансформаторы, находящіеся подъ нагрузкой большую часть времени, должны

обладать меньшими экономическими потерями, потери же на перемагничивание не играют в нихъ особо существенной роли и поэтому такіе трансформаторы конструируются съ преобладаніемъ $P_{\text{н}}$ надъ омическими потерями. Трансформаторы, нагружаемые лишь кратковременно, наоборотъ, должны обладать возможно меньшими потерями на перемагничивание, такъ какъ въ противоположномъ случаѣ соотношеніе между суточными потерями и суточной работой трансформатора становится невыгоднымъ. Омическія же потери, въ виду кратковременности работы, представляются несущественными и потому должны преобладать надъ $P_{\text{н}}$.

Электрическая тяга.

Автономная электрическая тяга, при которой потребная для передвиженія энергія получается или вырабатывается непосредственно на подвижномъ составѣ, нашла себѣ примѣненіе въ видѣ отдѣльныхъ вагоновъ-двигателей, оборудованныхъ электродвигателями, при чемъ послѣдніе питаются токомъ отъ помѣщаемыхъ въ этихъ вагонахъ аккумуляторовъ или небольшихъ генераторныхъ установокъ. Такіе вагоны-двигатели назначаются обыкновенно для обслуживанія мѣстнаго пассажирскаго движенія на участкахъ небольшого протяженія при незначительныхъ размѣрахъ указаннаго движенія.

Электрическая же тяга въ большемъ масштабѣ, т. е. тяга цѣлыхъ поѣздовъ, какъ пассажирскихъ, такъ и товарныхъ на большія разстоянія, производится исключительно путемъ полученія потребной энергіи извнѣ съ большихъ центральныхъ электрическихъ станцій черезъ посредство контактныхъ проводовъ или третьихъ рельсъ и соотвѣтствующихъ токоприемниковъ на электровозахъ и вагонахъ-двигателяхъ. Для цѣлей тяги въ настоящее время примѣняется токъ трехъ видовъ, а именно, постоянный, однофазный переменный и трехфазный переменный.

Постоянный токъ.

По условіямъ движенія поѣздовъ электродвигатели, обслуживающіе тягу этихъ поѣздовъ, должны развивать наибольшій движущій моментъ при троганіи съ мѣста, развивать большое ускореніе и измѣнять въ значительныхъ предѣлахъ движущій моментъ во время хода поѣзда для возможности примѣненія къ условіямъ профиля, а также возможности нагона поѣздомъ времени, въ случаѣ его опозданія. Всѣмъ этимъ требованіямъ въ полной мѣрѣ отвѣчаетъ электродвигатель постоянного тока съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ.

Такъ какъ для уменьшенія потерь при передачѣ энергіи на электровозъ или вагонъ-двигатель по контактнѣмъ проводамъ представляется необходимымъ передавать энергію при возможно болѣе высокомъ напряженіи, то конструкторами было обращено большое вниманіе на сооруженіе электродвигателей высокихъ напряженій. Вполнѣ надежной представляется работа электродвигателей постоянного тока, построенныхъ въ среднемъ на 600 вольтъ. Для повышенія напряженія въ контактнѣхъ проводахъ включается по два электродвигателя послѣдовательно. Обратнымъ проводомъ служатъ рельсы.

Регулированіе скорости производится при помощи сопротивленій (реостата), включаемыхъ послѣдовательно съ электродвигателями и поглощающихъ излишекъ напряженія при данномъ режимѣ работы.

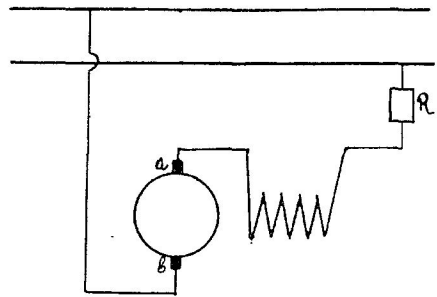
Система тяги при помощи постоянного тока, дающая прекрасные результаты въ отношеніи надежности дѣйствія и удобства обслуживанія, встрѣчаетъ существенныя препятствія въ отношеніи примѣненія ея къ линіямъ большого протяженія изъ за экономическихъ соображеній. Такъ какъ напряженіе между контактнѣмъ и обратнымъ проводами ограничено допустимымъ напряженіемъ у борновъ электродвигателей (при послѣдовательномъ включеніи 2-хъ электродвигателей около 1.200 вольтъ), то, во избѣжаніе большихъ потерь энергіи въ контактнѣхъ проводахъ и уменьшенія расхода на мѣдь для этихъ проводовъ, необходимо доставлять энергію въ контактные провода съ центральной электрической станціи по питательнымъ линіямъ при очень высокомъ напряженіи, понижая затѣмъ послѣднее до напряженія, существующаго между контактнѣмъ и обратнымъ проводами. Повышеніе же и пониженіе напряженія осуществляется легко и удобно, только при переменномъ токѣ помощью статическихъ трансформаторовъ. Въ виду сего энергія на центральной электрической станціи вырабатывается обыкновенно въ видѣ переменнаго трехфазнаго тока, затѣмъ тамъ же напряженіе тока повышается до напряженія, измѣряемаго десятками тысячъ вольтъ въ зависимости отъ дальности передачи, и въ такомъ видѣ токъ передается къ желѣзнодорожной линіи. Вдоль послѣдней устраиваются подстанціи, на которыхъ напряженіе трехфазнаго переменнаго тока понижается до нѣсколькихъ сотенъ вольтъ, и въ такомъ видѣ токъ питаетъ трехфазные электродвигатели, которые приводятъ въ дѣйствіе генераторы постоянного тока. Полученный такимъ образомъ постоянный токъ поступаетъ въ контактный проводъ. Въ зависимости отъ интенсивности движенія подстанціи приходится располагать

болѣе или менѣе часто. Стоимость какъ сооруженія подстанцій, такъ и ихъ обслуживанія очень велика и является причиной ограниченія примѣненія постоянного тока для электрической тяги на линияхъ большого протяженія.

Однофазный токъ.

Переменный токъ въ этомъ отношеніи имѣетъ значительныя преимущества передъ постояннымъ токомъ, такъ какъ энергія, передаваемая съ центральной электрической станціи къ желѣзнодорожной линіи въ видѣ переменнаго тока при напряженіи, на примѣръ, 70.000 вольтъ, преобразуется въ токъ пониженнаго напряженія (около 10.000 вольтъ) на подстанціяхъ при помощи статическихъ трансформаторовъ, не требующихъ за собою непрерывнаго наблюденія. Поэтому такія подстанціи значительно дешевле, какъ въ отношеніи сооруженія, такъ и эксплуатаціи, подстанцій съ вращающимися преобразователями тока. Кромѣ того, трансформаторныя подстанціи располагаются значительно рѣже преобразовательныхъ, благодаря болѣе высокому напряженію, допускаемому въ контактныхъ проводахъ, а именно: около 10.000 вольтъ при однофазномъ токѣ и 1.200—1.500 вольтъ при постоянномъ токѣ. Токъ изъ контактныхъ проводовъ при 10.000 вольтахъ поступаетъ въ трансформаторъ, находящійся на электровозѣ и вагонѣ-двигателѣ, и затѣмъ напряженіе его понижается до напряженія, при которомъ можетъ работать электродвигатель однофазнаго тока (200—300 вольтъ — серіесъ-двигатель, до 3.000 вольтъ — компенсированный репульсионный двигатель Винтеръ—Айхберга).

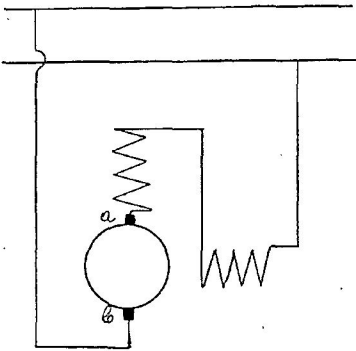
Условіямъ работы желѣзнодорожной тяги, какъ выше было упомянуто, наиболѣе отвѣчаютъ двигатели съ серіесной характеристикой. Двигатели этого типа, построенные для постоянного тока,



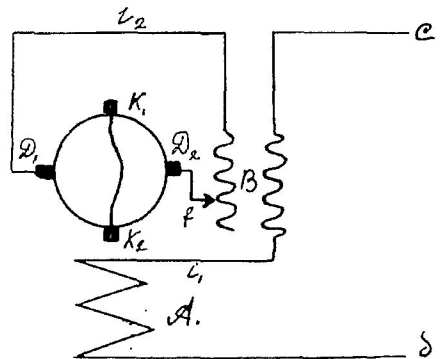
Черт. 89.

непосредственно не пригодны для однофазнаго тока, такъ какъ переменный токъ, проходя по обмоткѣ якоря, создаетъ по линіи щетокъ *ab* (черт. 89) переменный магнитный потокъ, который индуцируетъ въ той же обмоткѣ якоря электродвижущую силу самоиндукціи и вызываетъ, благодаря этому, очень большой сдвигъ фазы тока по отношенію къ напряженію у борновъ.

Для устранения этого въ серіе-двигателяхъ однофазнаго тока въ статоръ электродвигателя помѣщается по оси ab компенсаціонная обмотка, включаемая послѣдовательно съ обмоткой электромагнитовъ и якоря (черт. 90). При такомъ расположеніи компенсаціонной обмотки эта обмотка вмѣстѣ съ обмоткой якоря представляютъ собою двѣ обмотки трансформатора, токъ въ которыхъ отстаетъ другъ отъ друга по фазѣ на 180° и амперъ-витки коихъ дѣйствуетъ поэтому взаимнопротивоположно, ограничивая магнитный потокъ по оси ab незначительной величиной. Этого рода электродвигатели примѣняются для электрической тяги фирмами Сименсъ-Шуккертъ, Вестингаузь и др. Другой типъ электродвигателей однофазнаго тока, нашедшій себѣ довольно



Черт. 90.



Черт. 91.

широкое примѣненіе, это компенсированный репульсіонный электродвигатель системы Винтеръ-Айхберга (черт. 91). Въ первичную цѣпь cd включены послѣдовательно первичная обмотка трансформатора B и компенсаціонная обмотка A . Токъ изъ вторичной обмотки трансформатора B , отстающій отъ первичнаго тока по фазѣ на 180° , питаетъ якорь черезъ щетки $D_1 D_2$ и создаетъ магнитное поле по оси $D_1 D_2$. Обмотка A индуцируетъ въ обмоткѣ якоря по оси коротко замкнутыхъ щетокъ $K_1 K_2$, по принципу трансформатора, токъ отстающій на 180° отъ первичнаго тока и слѣдовательно, токъ въ якорѣ по оси $K_1 K_2$ совпадаетъ по фазѣ съ магнитнымъ полемъ по оси $D_1 D_2$ и такимъ образомъ создаются условія работы, необходимыя для работы электродвигателя, а именно магнитное поле, ось котораго перпендикулярна оси, составляемой щетками $K_1 K_2$, черезъ которыя циркулируетъ рабочій токъ. Регулированіе скорости вращенія однофазныхъ электродвигателей совершается безъ потерь въ реостатахъ при помощи и

мѣненія коэффициента трансформации въ трансформаторахъ (подвижной контактъ f на черт. 91).

Рабочими проводами служатъ, какъ и при постоянномъ токъ, контактный воздушный проводъ и путевые рельсы.

Трехфазный токъ.

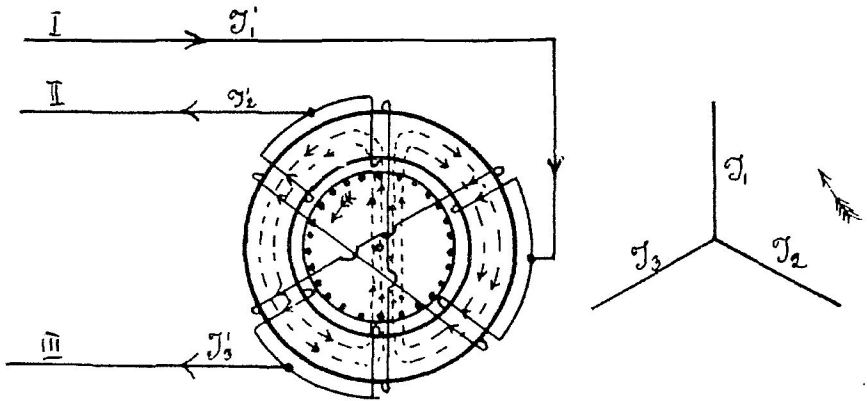
Въ отношеніи передачи энергіи отъ центральной электрической станціи и пониженія напряженія на трансформаторныхъ подстанціяхъ трехфазный токъ имѣетъ передъ постояннымъ токомъ тѣ же преимущества, что и однофазный. Такъ какъ статорная обмотка трѣхфазныхъ двигателей можетъ включаться непосредственно въ цѣпь съ напряженіемъ до 3.000 вольтъ, то особыхъ понижающихъ трансформаторовъ на электровозѣ или вагонѣ-двигателѣ не устанавливается и поэтому напряжение въ контактныхъ проводахъ ограничивается 3.000 вольтъ. Въ виду этого трансформаторныя подстанціи при трехфазномъ токъ располагаются чаще, нежели при однофазномъ, при которомъ напряжение въ контактныхъ проводахъ составляетъ около 10.000 вольтъ.

Контактные провода, число которыхъ должно равняться тремъ, устраиваются обыкновенно изъ двухъ воздушныхъ проводовъ, третьимъ же проводомъ служатъ рельсы. Извѣстныя техническія трудности въ отношеніи изоляціи представляетъ устройство на станціяхъ крестовинъ и переводовъ изъ контактныхъ проводовъ.

Въ отношеніи регулированія скорости вращенія трехфазныхъ электродвигателей эти двигатели находятся въ значительно худшихъ условіяхъ по сравненію съ электродвигателями постоянного и однофазнаго поремѣннаго токовъ, такъ какъ обладаютъ постоянной скоростью вращенія.

На черт. 92 показанъ схематически двуполусный трехфазный электродвигатель. Неподвижная его часть или статоръ снабженъ обмоткой, включенной въ цѣпь треугольникомъ. Изъ діаграммы токовъ въ подводящихъ проводахъ, принимая за положительное значеніе направленіе тока къ электродвигателю, усматривается, что когда токъ въ проводѣ I будетъ имѣть наибольшее положительное значеніе, въ другихъ двухъ проводахъ токъ половиннаго размѣра будетъ имѣть отрицательное значеніе. Направленіе тока въ фазныхъ обмоткахъ электродвигателя обусловливаетъ появленіе въ немъ магнитнаго потока, согласно черт. 92. Черезъ промежутокъ

времени, равный $\frac{1}{3}$ периода,—максимумъ тока будетъ въ проводѣ II и магнитный потокъ повернется на 120° . Черезъ слѣдующую треть періода магнитный потокъ повернется еще на 120° . Такимъ образомъ, за время одного періода магнитный потокъ совершитъ одинъ полный оборотъ. Въ четырехполосномъ двигателѣ скорость вращенія магнитнаго поля будетъ въ два раза меньше, въ шестиполосномъ въ три раза меньше и т. д. Самая скорость вращенія магнитнаго поля, зависящая только отъ числа періодовъ, постоянна. Подъ вліяніемъ вращающагося магнитнаго поля въ обмоткѣ ротора или вращающейся части электродвигателя, состоящей изъ желѣзнаго сердечника съ навитой на него изолированной проволокой, индуцируется напряженіе и появляется токъ, который побуждаетъ роторъ слѣдовать за вращающимся



Черт. 92.

полемъ съ той же скоростью. Если подъ вліяніемъ нагрузки роторъ начинаетъ отставать отъ магнитнаго поля, то, благодаря увеличенію относительной скорости вращенія магнитнаго потока по отношенію къ ротору, въ обмоткѣ ротора увеличивается индуцируемая электродвижущая сила, а слѣдовательно и токъ, который въ свою очередь увеличиваетъ и движущій моментъ. Обмотка ротора въ электродвигателяхъ большой мощности устраивается въ видѣ трехфазной, аналогично статорной обмоткѣ, при чемъ концы ея приключаются къ тремъ контактнымъ кольцамъ, щетки которыхъ соединены съ регулировочными сопротивленіями. При пускѣ электродвигателей въ ходъ приходится поглощать въ реостатахъ очень значительное количество энергіи. При достиженіи нормальной скорости сопротивленія замыкаются на короткую.

Въ виду вышеупомянутаго постоянства скорости вращенія трехфазнаго электродвигателя приходится, для возможности регулированія его скорости, прибѣгать къ довольно сложнымъ схемамъ переключеній какъ статорныхъ, такъ и роторныхъ обмотокъ, достигая этимъ измѣненія числа полюсовъ.

Въ отношеніи надежности дѣйствія, а также своей относительной легкости (вѣса, отнесеннаго къ 1 *КВ*) трехфазные двигатели наряду съ двигателями постояннаго тока имѣютъ преимущество передъ однофазными. Наиболѣе пригодна система трехфазнаго тока для горныхъ дорогъ благодаря особенности трехфазныхъ электродвигателей на уклонахъ автоматически тормазить поѣзда и отдавать при этомъ энергію въ линію.

Проектированіе электрической тяги.

При проектированіи электрической тяги представляется необходимымъ исходить изъ существующихъ типовъ электродвигателей, характеристическія кривыя которыхъ, выражающія зависимость между токомъ, потребляемымъ электродвигателемъ, и развиваемою электродвигателемъ скоростью v , а также силой тяги F , извѣстны. При тягѣ же помощью электровозовъ приходится сообразоваться съ существующими типами электровозовъ вообще.

Общая мощность электродвигателей одного поѣзда опредѣляется изъ заданныхъ условій работы, напр., движенія поѣзда по данному профилю съ данной скоростью, для чего требуется, чтобы двигатели развивали силу тяги, необходимую для преодоленія различнаго рода сопротивленій. Опредѣленная на основаніи этихъ сопротивленій потребная сила тяги въ соотвѣтствіи съ заданной скоростью является руководящимъ основаніемъ для выбора помощью характеристическихъ кривыхъ электродвигателей числа электродвигателей и ихъ мощности. Въ зависимости отъ типа выбранныхъ электродвигателей и профиля дороги опредѣляются нижеуказаннымъ способомъ расходъ тока (при переменномъ токѣ расходъ энергіи) на поѣздъ, съ одной стороны, на разныхъ элементахъ профиля, т. е. въ функціи отъ проходимаго поѣздомъ пути, съ другой стороны, въ функціи отъ времени.

Графикъ движенія на заданномъ участкѣ дороги въ связи съ кривыми расхода тока (энергіи) въ функціи отъ проходимаго

пути и въ функціи отъ времени даетъ возможность опредѣлить въ каждый данный моментъ общій расходъ тока или энергіи на всей линіи, а, слѣдовательно, и мощность центральной электрической станціи, а также отдѣльныхъ подстанцій. Расчетъ сѣченія проводовъ рабочихъ и питающихъ, какъ съ электрической точки зрѣнія, т. е. съ точки зрѣнія потерь энергіи въ проводахъ и паденія въ нихъ напряженія, такъ и съ механической, т. е. прочность проводовъ, а также прочности поддерживающихъ ихъ мачтъ, въ связи съ вышеуказаннымъ выборомъ типа электродвигателей и ихъ мощности, опредѣленіемъ мощности подстанцій и центральной станціи и являются основными элементами проекта электрической тяги.

Сила тяги, которую долженъ развивать электродвигатель, опредѣляется изъ уравненія движенія поѣзда

$$F = \frac{P_1'}{g} \cdot \frac{dv}{dt} + \Sigma R,$$

гдѣ P_1 —вѣсъ въ кгр. части поѣзда, приходящейся на одинъ электродвигатель, а $P_1' = P_1 + p$, при чемъ p , согласно нижеизложеннаго, фиктивное увеличеніе вѣса, благодаря вращающимся частямъ; g —ускореніе силы тяжести 9,81 м./сек.²; $\frac{dv}{dt}$ —ускореніе мт./сек.², которое поѣздъ получаетъ въ разсматриваемый моментъ.

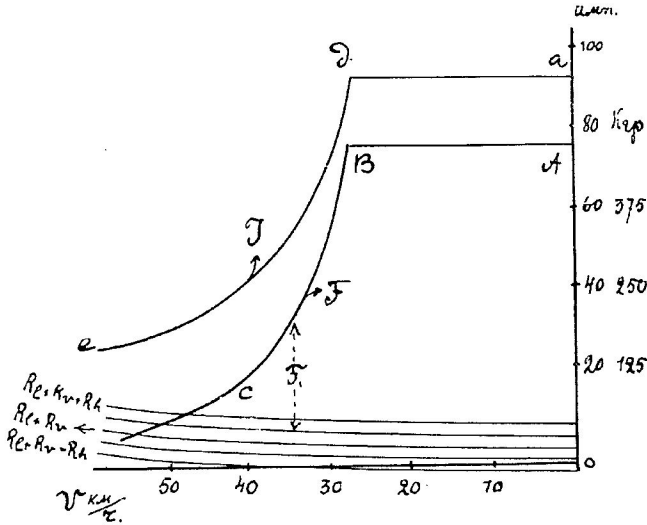
ΣR —соотвѣтствующая часть суммы сопротивленій, преодолеваемыхъ поѣздомъ при своемъ движеніи, приходящаяся на одинъ двигатель. Выраженіе $\frac{P_1'}{g} \cdot \frac{dv}{dt}$ представляетъ собою ту силу, которая сообщаетъ массѣ $\frac{P_1'}{g}$ ускореніе $\frac{dv}{dt}$. Необходимо имѣть въ виду, что кромѣ поступательнаго ускоренія самаго поѣзда, часть силы тяги F должна расходоваться на увеличеніе живой силы вращательнаго движенія частей электровоза или вагоновъ-двигателей, а именно, электродвигателей и передачъ отъ нихъ къ движущимъ осямъ. Для удобства расчетовъ можно разсматривать вліяніе вращающихся частей, какъ фиктивное увеличеніе вѣса— p , электровоза или вагона-двигателя, достигающее на практикѣ 10—15%. Для прицепныхъ вагоновъ это увеличеніе не превышаетъ 2% (см. Вульфъ „Электрическая тяга“, стр. 213—215).

Сопротивленія ΣR движенію поѣзда могутъ быть расчленены на сопротивленія, зависящіе отъ скорости движенія поѣзда— v , и на сопротивленія, не зависящіе отъ v .

Къ первымъ относятся R_l — сопротивление качению на прямомъ горизонтальномъ пути ¹⁾, и R_v — сопротивление воздуха, дѣйствующаго на лобовую и боковыя поверхности поѣзда ²⁾.

Ко вторымъ принадлежатъ R_h — сопротивление на подъемѣ ($R_h = \frac{P_1}{1.000} \cdot h$ кгр., гдѣ h подъемъ въ тысячныхъ) и R_k — сопротивление на кривой (можно пользоваться эмпирической формулой вида $R_k = \frac{P_1}{1.000} \cdot 500 \cdot \frac{\delta}{r}$, гдѣ S — ширина колеи, r — радиусъ кривой).

При помощи выражений для R_l и R_v вычисляются суммарныя значенія для R_l и R_v при разныхъ скоростяхъ v км./часъ и



Черт. 93.

строится кривая сопротивленія $R_l + R_v$ въ функціи отъ v (черт. 93). На томъ же графикѣ вычерчиваются кривыя

$$R_l + R_v + R_h = f(v)$$

¹⁾ Согласно формулы Франка

$$R_l = (2,5 + 0,00015v^2) \frac{P_1}{1.000} \text{ кгр.}$$

²⁾ Согласно формулы Франка

$$R_v = \frac{0,0054 (1,1S + 2 + ns) v^2}{a} \text{ кгр.}$$

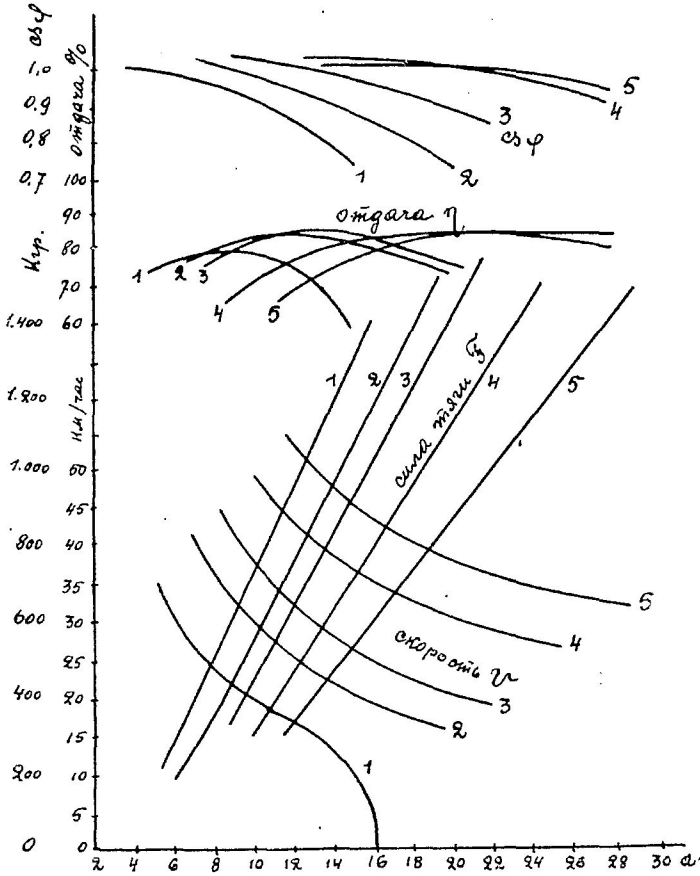
гдѣ S — лобовая поверхность поѣзда, n — число вагоновъ, s — коэффициентъ представляющій эквивалентную поверхность прицепнаго вагона, a — число двигателей въ поѣздѣ. (См. А. Вульфъ „Электрическая тяга“ стр. 205).

для разных значений $\pm h$. Сопротивление на кривой, отнесенное к одной тонне вѣса поѣзда, можетъ быть замѣнено фиктивным подъемомъ: $h_1 = 500 \frac{\delta}{\gamma}$, что даетъ возможность пользоваться кривыми $R_1 + R_r + R_h$, принимая для h въ разсматриваемой точкѣ профиля результирующее значение $h_1 \pm h$.

Далѣе на томъ же чертежѣ наносятся по оси ординатъ значенія силы тяги F , развиваемой электродвигателемъ при различныхъ скоростяхъ v км./часъ. Зависимость F отъ v км./часъ получается изъ характеристическихъ кривыхъ электродвигателей. Эти кривыя изображаютъ измѣненіе вращающаго момента M и числа оборотовъ n въ функціи отъ силы тока въ якорѣ (см. черт. 45 — кривыя серіесъ двигателя постоянного тока, черт. 94 кривыя однофазнаго коллекторнаго двигателя ¹⁾).

1) На черт. 94 приведены четыре группы кривыхъ для компенсированнаго репульсионнаго двигателя въ функціи отъ силы тока i въ электродвигателѣ, а именно: кривыя $\cos \varphi$ (φ — сдвигъ фазы между токомъ и напряженіемъ), кривыя коэфф. полезнаго дѣйствія или отдачи η , силы тяги F и скорости вращенія электродвигателя, отнесенной къ скорости v движенія поѣзда. Въ каждой группѣ имѣется по пяти нумерованныхъ кривыхъ, соотвѣтственно пяти значеніямъ напряженія во вторичной цѣпи регулировочнаго трансформатора (черт. 91), каковое напряжение достигается уменьшеніемъ или увеличеніемъ числа витковъ вторичной обмотки регулировочнаго трансформатора помощью подвижнаго контакта f . При троганіи съ мѣста, когда обратная электродвижущая сила равна 0, во вторичную цѣпь трансформатора вводится наименьшее количество витковъ и поэтому у вторичныхъ зажимовъ регулировочнаго трансформатора дѣйствуетъ наименьшее напряжение. По мѣрѣ развитія электродвигателемъ скорости вращенія увеличивается обратная электродвижущая сила, а вслѣдствіе этого уменьшается токъ въ электродвигателѣ, а вмѣстѣ съ тѣмъ и сила тяги. Для сохраненія силы тяги на надлежащей высотѣ число витковъ во вторичной цѣпи увеличивается, напряжение повышается на соотвѣтствующую величину, а вслѣдствіе этого увеличивается и сила тока въ электродвигателѣ, которая, однако, затѣмъ, по мѣрѣ дальнѣйшаго увеличенія скорости вращенія электродвигателя снова начинаетъ уменьшаться. Въ дальнѣйшемъ число витковъ во вторичной цѣпи снова увеличивается и процессъ идетъ въ указанномъ порядкѣ. Послѣ того, какъ во вторичную цѣпь будутъ введены всѣ витки вторичной обмотки трансформатора и установлено предѣльное напряжение, сила тока въ электродвигателѣ измѣняется, въ зависимости отъ скорости, по автоматической кривой. На черт. 95 показано вышеописанное измѣненіе силы тока въ электродвигателѣ въ функціи отъ времени отъ начала троганія съ мѣста. i_1 i_2 кривыя измѣненія силы тока въ періодъ регулировки напряженія E трансформаторомъ, i — автоматическая кривая. На томъ же чертежѣ приведена кривая поглощаемой электродвигателемъ мощности — $KW = Ei \cos \varphi$, при чемъ необходимо имѣть въ виду, что, при вычисленіи мощности, значенія $\cos \varphi$ берутся изъ кривой черт. 94, отвѣчающей соотвѣтственному E , напр., при $E = E_3$, значенія для $\cos \varphi$ необходимо брать изъ кривой для $\cos \varphi$ за N_3 . Изъ черт. 95 усматривается, что мощность въ періодъ разгона возрастаетъ пропорціонально скорости.

На основаніи этихъ кривыхъ можетъ быть построена кривая M въ функціи отъ n , а принимая во вниманіе, что $M_{\gamma} = F \frac{D}{2}$, гдѣ γ ¹⁾ — коэффициентъ передачи отъ двигателя къ движущей



Черт. 94.

оси электроваза или вагона-двигателя, а D — діаметръ движущаго колеса, откуда $F = \frac{2M\gamma}{D}$, и что v км./часъ $= 3,6\pi \cdot D \cdot \frac{n}{\gamma}$, на основаніи тѣхъ же кривыхъ могутъ быть построены сначала кри-

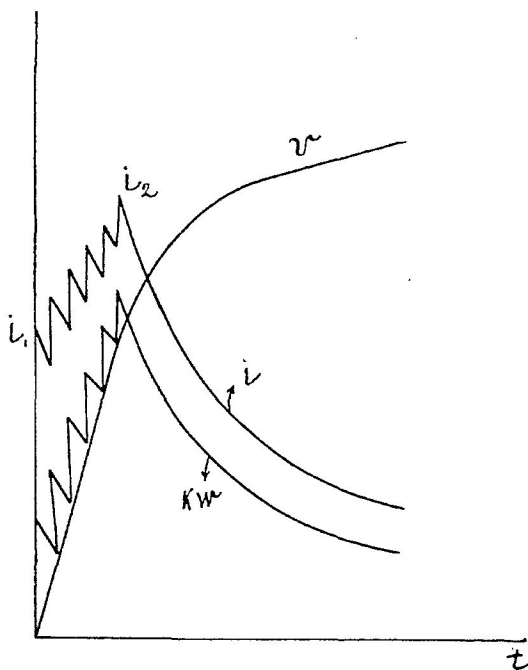
¹⁾ $\gamma = \frac{n}{n_1}$, гдѣ n число оборотовъ въ секунду якоря электродвигателя, а n_1 — число оборотовъ въ сек. движущаго колеса

$$2\pi \frac{D}{2} F n_1 = 2\pi M n.$$

$$F \frac{D}{2} : M = n : n_1 = \gamma.$$

вые F и v км./часъ въ функціи отъ тока въ якорѣ электродвигателя (черт. 96), а затѣмъ и кривая F въ функціи отъ v км./часъ, которая и наносится на черт. 93.

Такъ какъ въ однофазномъ коллекторномъ электродвигателѣ величины поглощаемой мощности не пропорціональны, въ особенности въ періодъ пуска въ ходъ, силамъ тока, питающаго двигатель, то кривыя F и v км./часъ необходимо строить въ функціи отъ энергіи поглощаемой двигателемъ, т. е. $Ei \cos \varphi$.



Черт. 95.

При электрической тягѣ при помощи серіе съ электродвигателей постоянного тока, названные электродвигатели, во избѣжаніе излишнихъ потерь энергіи въ реостатахъ, включаются въ первый періодъ разгона попарно послѣдовательно другъ съ другомъ и, кромѣ того, послѣдовательно съ регулировочнымъ реостатомъ, при помощи котораго токъ въ электродвигателяхъ поддерживается около нѣкоторой средней постоянной величины. По достиженіи скорости v_1 , равной около половины той скорости v_2 , при которой электродви-

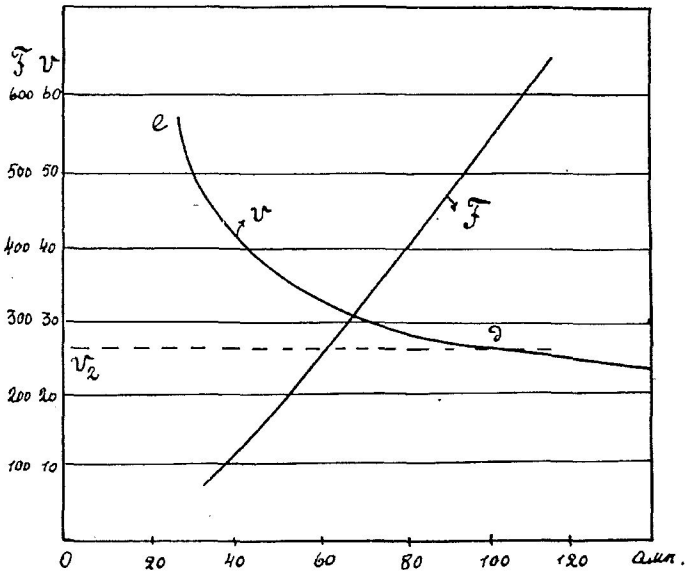
гатели могутъ работать безъ реостатовъ при полномъ напряженіи, т. е. при параллельномъ включеніи, электродвигатели переключаются параллельно и при помощи реостатовъ токъ снова поддерживается въ нихъ около той же средней величины. По достиженіи скорости v_2 реостаты выключаются и сила тока въ электродвигателяхъ начинаетъ измѣняться по кривой de (черт. 93), тождественной съ частью de на автоматической характеристикѣ электродвигателя.

Въ зависимости отъ характера измѣненія тока въ электродвигателяхъ измѣняется и развиваемая ими сила тяги F (кривая ABC на черт. 93). На участкѣ AB она остается постоянной, а затѣмъ начинаетъ убывать по кривой BC .

Разность ординат кривой F и кривой сопротивлений въ данномъ пунктѣ перегона представляетъ собой ту величину силы тяги F_1 , которая сообщаетъ поѣзду ускореніе.

На черт. 93 какъ кривыя сопротивлений движенію поѣзда, такъ и кривыя тока и силы тяги, отнесены къ одному электродвигателю.

Для удобства опредѣленія расхода энергіи, потребляемого цѣлымъ поѣздомъ при прохожденіи имъ перегона, кривыя сопротивлений $R_i + R_v$ и $R_i + R_v + R_n$ строятся для всего поѣзда и въ такомъ случаѣ на графикъ наносятся кривыя I и F для суммы электродвигателей, обслуживающихъ поѣздъ.



Черт. 96.

Слѣдуетъ имѣть въ виду, что при этомъ кривая I для series двигателей постоянного тока приметъ ступенчатый видъ $abcde$ (черт. 97), такъ какъ въ первый періодъ разгона, благодаря послѣдовательному включенію каждой пары электродвигателей, сила тока въ половину меньше, чѣмъ во второй періодъ разгона при параллельномъ включеніи. Характеръ же кривой силы тяги F остается прежній.

Для построенія кривой расхода тока на поѣздъ при постоянномъ токъ или кривой расхода энергіи при однофазныхъ электродвигателяхъ—въ функции отъ проходимаго поѣздомъ пути, а также въ функции отъ времени нахождения въ пути, предварительно строятся кривыя скоростей въ функцияхъ отъ обѣихъ названныхъ перемѣнныхъ.

Изъ общаго уравненія движенія поѣзда

$$F = \frac{P'}{3,6 \, g} \cdot \frac{dv}{dt} + \Sigma R,$$

гдѣ P' —вѣсъ цѣлаго поѣзда въ кгр. съ поправкой на инерцію вращающихся массъ, а v выражено въ км./часъ, опредѣлимъ $\frac{dv}{dt}$:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{3,6 g}{P'} (F - \Sigma R).$$

$F - \Sigma R = F_1$, каковую величину находимъ непосредственно изъ диаграммы (черт. 97).

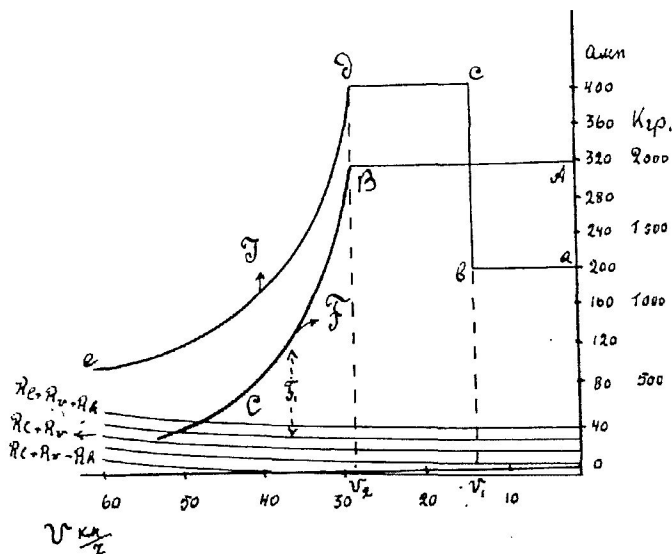
При конечныхъ измѣненіяхъ скорости

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{3,6 \text{ g}}{P'} \cdot F_1,$$

откуда

$$\Delta t = \frac{P'}{3,6 \text{ q } F_1} \cdot \Delta v.$$

Задавая произвольныя небольшія значенія для Δv на основаніи послѣдняго равенства вычисляются соотвѣтствующіе проме-



Черт. 97.

жутки времени, въ теченіе коихъ происходитъ заданное измѣненіе скорости и строится кривая скорости въ функціи отъ времени. F_1 опредѣляется изъ діаграммы (черт. 97) для среднихъ скоростей $v_m = v_0 + \frac{\Delta v}{2}$, гдѣ v_0 начальная скорость, получающая приращеніе Δv .

Пройденный поѣздомъ путь за время Δt при средней скорости v_m опредѣляется изъ выраженія $\Delta l = \frac{v_m}{3,6} \Delta t$ ¹⁾.

Необходимые элементы для построенія кривыхъ скоростей въ функціяхъ отъ t и l при движеніи поѣзда безъ тока опредѣляется, такъ какъ $F = 0$, изъ равенства

$$\Delta t = - \frac{P'}{3,6 g} \cdot \frac{1}{\Sigma R} \cdot \Delta v.$$

Данныя для построенія соотвѣтственныхъ кривыхъ при торможении опредѣляются при помощи выраженія

$$\Delta t = - \frac{P'}{3,6 g} \cdot \frac{1}{\Sigma R + R_t} \cdot \Delta v,$$

такъ какъ къ сопротивленіямъ движенію поѣзда присоединяется тормозящее усиліе R_t , пропорціональное числу тормозныхъ колесъ, давленію тормозныхъ колодокъ на колеса и коэффициенту тренія.

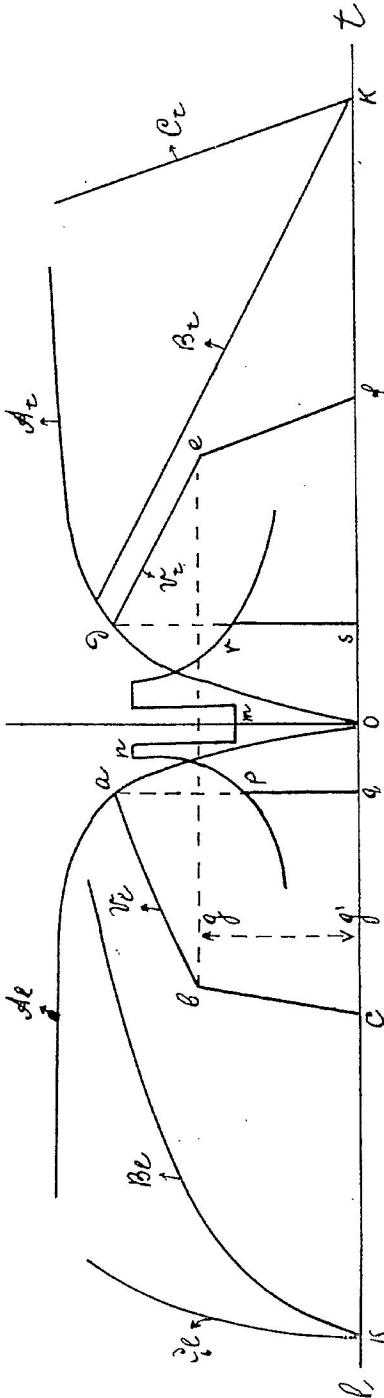
При построеніи вышеупомянутыхъ кривыхъ приходится различать слѣдующіе періоды движенія поѣзда: періодъ разгона, продолжающійся до момента, когда тяговое усиліе, развиваемое электродвигателями уравнивается съ сопротивленіями движенію поѣзда, періодъ движенія поѣзда согласно автоматическихъ кривыхъ электродвигателей сообразно съ профилемъ участка перегона, періодъ движенія безъ тока, передъ торможеніемъ и періодъ торможенія.

Сначала рассмотримъ порядокъ построенія кривыхъ въ простѣйшемъ случаѣ, когда послѣ окончанія перваго періода наступаетъ сразу третій, а потомъ четвертый.

По оси абсциссъ (черт. 98) вправо отъ точки O откладываются значенія t , а влѣво отъ точки O значенія l . По оси ординатъ откладываются значенія v , соотвѣтствующія значеніямъ $\Sigma \Delta t$ (вправо отъ точки O) и значеніямъ $\Sigma \Delta l$ (влѣво отъ точки O). Такимъ путемъ получаютъ кривыя скоростей v_t и v_l , начиная отъ момента троганія съ мѣста, а именно кривыя A_t и A_l .

¹⁾ Необходимые элементы для построенія кривыхъ скоростей въ функціяхъ отъ t и l для примѣра приведены въ слѣдующей таблицѣ:

Δv	v	v_m	F_1	$\frac{P'}{g \cdot F_1}$	Δt	$\Sigma \Delta t$	Δl	$\Sigma \Delta l$
10	10	5	1925	0,48	4,8	4,8	6,7	6,7
10	20	15	1910	0,48	4,8	9,6	20,0	26,7
7,4	27,4	23,7	1890	0,48	3,55	13,15	24,3	51
2,6	30	48,7	1650	0,55	1,43	14,58	11,4	62,4
2,0	32	31	1240	0,74	1,48	16,06	12,7	75,1



Черт. 98.

Кривыя скоростей въ періодъ движенія поѣзда безъ тока B_i, B_e и въ періодъ торможенія C_i, C_e строятся, начиная отъ произвольныхъ точекъ k , въ направленіи къ точкѣ O , такъ какъ, согласно вышеприведенныхъ формулъ, абсциссы получаются отрицательныя.

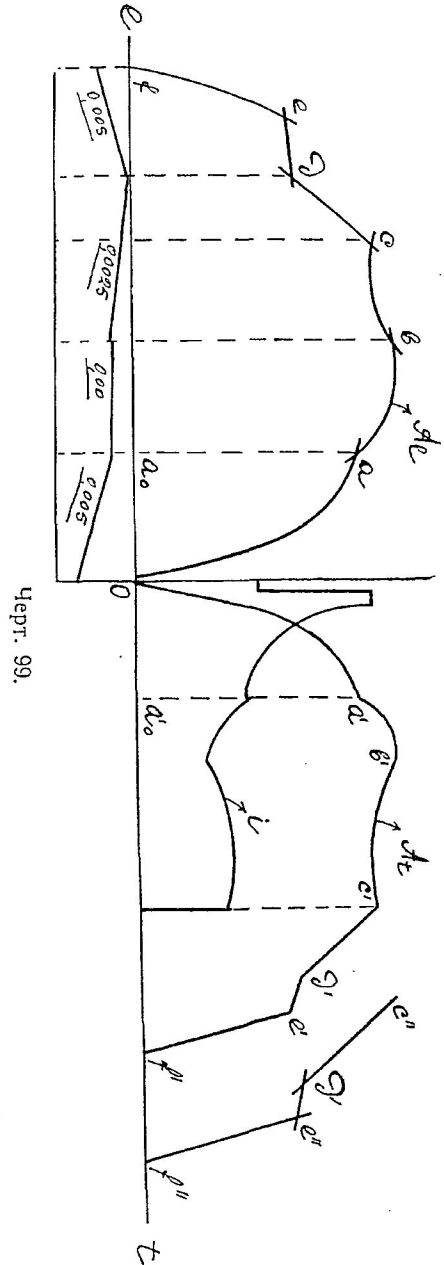
Отложивъ по оси Ol длину перегона $L_1 = OC$, проводимъ черезъ точку c кривую торможенія cb путемъ перенесенія точекъ кривой C_i параллельно оси Ol въ положеніе cb . Если скорость движенія поѣзда, при которой начинается торможеніе, установлена, напр. gg_1 , то, проведя линію, параллельную оси абсциссъ на разстояніи gg_1 , до пересѣченія съ кривой торможенія cb , получаемъ точку b , отъ которой начинается кривая движенія безъ тока по инерціи. Переносимъ кривую B_i такъ, чтобы она прошла черезъ точку b , т. е. въ положеніе ba . Пересѣченіе кривыхъ A_i съ ba въ точкѣ a опредѣляетъ положеніе точки q на оси Ol , въ которой происходитъ выключеніе тока.

Кривая $Oabc$ и представляетъ собою кривую скорости поѣзда въ функціи отъ проходимаго пути. Нанеся по оси ординатъ величины тока, потребляемаго всѣми двигателями соотвѣтственно скорости движенія поѣзда (черт. 97), получаемъ кривую $Ompq$ расхода тока въ функціи отъ проходимаго пути.

Для построенія тѣхъ же кривыхъ въ функціи отъ времени на-

хожденія въ пути замѣчаемъ, что площадь $Oabc$, дѣленная на Oc , представляетъ собою среднюю скорость v_m . Въ свою очередь Oc , дѣленное на v_m , представляетъ собою время T_1 пробѣга по перегону. Откладывая по оси Ot указанное время $Of = T_1$, получаемъ точку f , являющуюся конечной точкой кривой торможения. Поэтому черезъ точку f проводимъ вышеуказаннымъ способомъ кривую торможения C_1 , находимъ точку e — начало торможения и, наконецъ, черезъ точку e проводимъ кривую движения по инерціи B_1 . Кривая $Odef$ представляетъ собою кривую скорости v_i въ функции отъ времени нахождения въ пути. Кривая $Omr's$ расхода тока въ функции отъ времени въ пути строится вышеуказаннымъ способомъ.

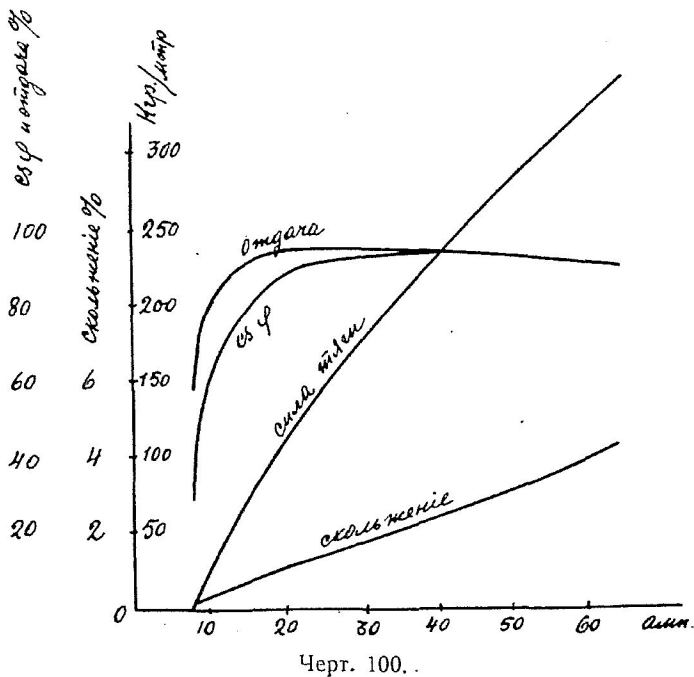
Построение вышеупомянутыхъ кривыхъ въ общемъ случаѣ, когда послѣ періода разгона движение поѣзда происходитъ по автоматическимъ кривымъ электродвигателей, сообразно съ профилемъ пути, и затѣмъ уже слѣдуетъ періодъ движенія безъ тока и торможение, производится вышеуказаннымъ способомъ, т. е. сначала строится кривая разгона до точки перелома профиля, что отвѣчаетъ точкѣ a на кривой v_i на черт. 99. Соответствующая точка на кривой въ функции отъ t (правая половина черт. 99) находится путемъ отложенія по оси абсциссъ $Oa'_0 = \frac{Oa_0}{v_m}$, гдѣ $v_m = \frac{Oa_0 a}{Oa_0}$. Отъ



точки a построение кривой v_i ведется далѣе до слѣдующаго перелома профиля, т. е. до точки b , и соответственно строится

кривая v_i ; при чемъ точка ея b' находится указаннымъ способомъ и т. д.

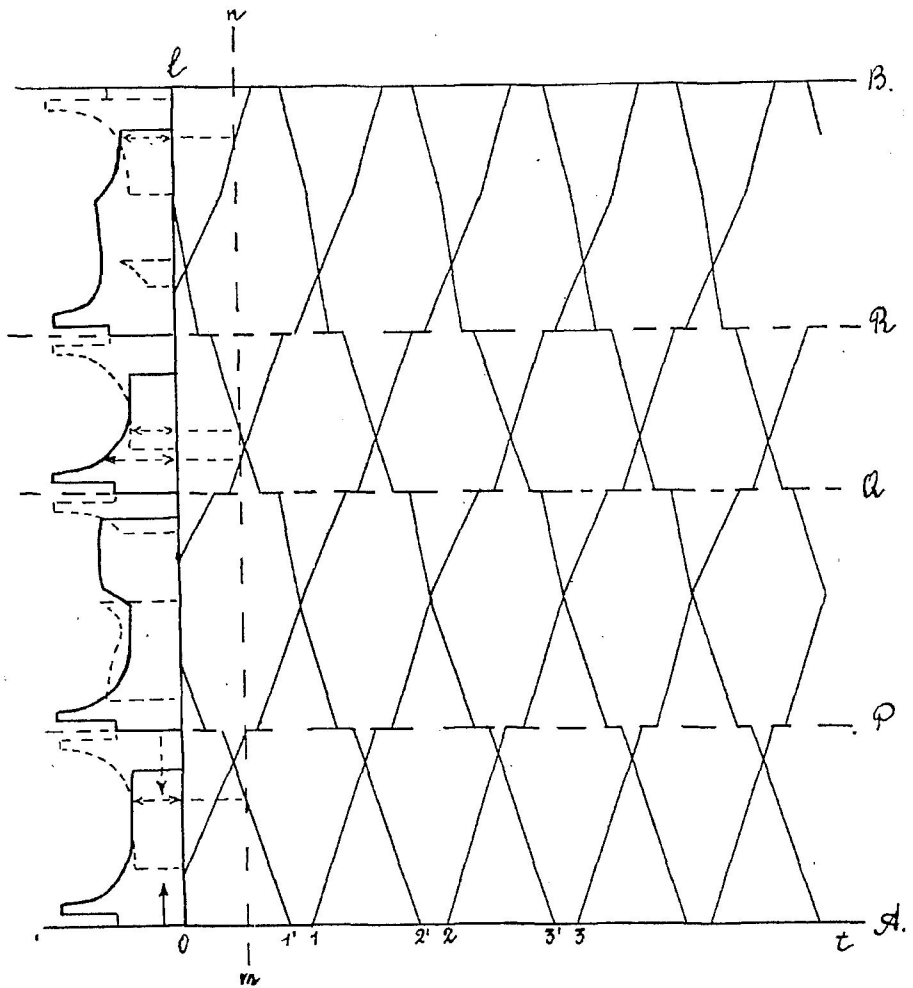
Подходя къ концу перегона Of , изъ точки f строится кривая тормажения fe , а затѣмъ изъ точки e , ордината которой отвѣчаетъ скорости, при которой начинается торможение, строится кривая движенія безъ тока ed до пересѣченія съ кривой v_i . Абсцисса Of' для конечной точки кривой A_i находится вышеуказаннымъ способомъ $\left(\frac{Of}{v_m}\right)$ и затѣмъ, идя изъ точки f' , заканчивается построение кривой v_i построениемъ кривой торможения $f'e'$ и кривой движенія безъ тока $e'd'e'$. Кривая расхода тока (или энергии при



переменномъ токъ) i_i (черт. 99) строится на основаніи диаграммы $abede$ (черт. 97).

Въ случаѣ тяги при помощи трехфазнаго тока построение кривой расхода энергіи упрощается, такъ какъ, кромѣ періода разгона, когда примѣняется регулирование скорости реостатомъ и при помощи разныхъ комбинацій включенія электродвигателей, скорость вращенія послѣднихъ, а, слѣдовательно, и движенія поѣзда постоянна, а потому расходъ энергіи опредѣляется въ зависимости отъ развиваемой силы тяги, согласно диаграммы трехфазнаго электродвигателя (черт. 100).

Для опредѣленія мощности центральной электрической станціи необходимо построить діаграмму нагрузки станціи въ зависимости отъ энергіи, потребляемой всѣми поѣздами, находящимися въ разсматриваемый моментъ въ движеніи на линіи.



Черт. 101.

Для этой цѣли строится суточный графикъ движенія поѣздовъ (черт. 101), по оси ординатъ котораго откладываются перегонныя разстоянія, а по оси абсциссъ времена хода по перегонамъ, опредѣленныя на основаніи діаграммы 99 (*Of'*). Сбоку графика на перегонныхъ разстояніяхъ строятся кривыя расхода энергіи или тока въ функціи отъ проходимаго пути, при чемъ онѣ изо-

бражены для поѣздовъ, движущихся отъ A къ B , сплошными линиями, а для обратныхъ поѣздовъ пунктирными.

Далѣе проводятъ рядъ прямыхъ mn , параллельныхъ оси Ol и расположенныхъ тѣмъ ближе другъ къ другу, чѣмъ рѣзче ожидаемая колебанія нагрузки.

Пересѣченіе линий mn съ линиями движенія поѣздовъ $0, 1', 1, 2', 2$ и т. д. опредѣляетъ, какіе поѣзда находятся въ данный моментъ на линіи, и въ какихъ именно мѣстахъ отдѣльныхъ перегонѣвъ AP, PQ, QR и т. д. Ординаты кривыхъ расхода энергіи или тока, отвѣчающія указаннымъ точкамъ пересѣченій линіи mn съ линиями движенія поѣздовъ, даютъ въ суммѣ нагрузку станцій въ данный моментъ, считая нагрузку на рабочихъ проводахъ, отъ которой затѣмъ, путемъ учета потери энергіи въ рабочихъ и питательныхъ проводахъ, на подстанціяхъ и т. д. переходятъ къ нагрузкѣ станціи на ея шинахъ.

Вышеупомянутая діаграмма суточной нагрузки станціи получается путемъ нанесенія по оси абсциссъ суточного времени, а по оси ординатъ нагрузки станціи въ отдѣльные моменты, отвѣчающей сѣченіямъ линій mn .

Расчетъ электрическихъ проводовъ.

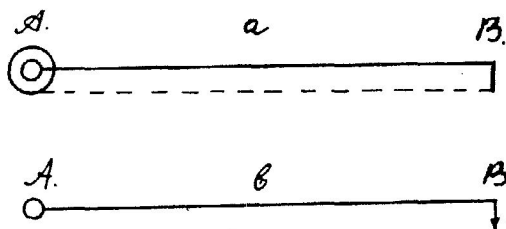
При расчетѣ сѣченія проводовъ, по которымъ подводится или распредѣляется электрическая энергія въ видѣ постоянного тока, исходятъ изъ допустимой потери напряженія e_p въ проводахъ, выраженной въ вольтахъ.

Если черезъ p обозначить допустимый процентъ потери напряженія въ проводахъ отъ напряженія E_1 , дѣствующаго между проводами въ началѣ разсматриваемаго участка таковыхъ, то

$$e_p = \frac{p}{100} E_1 \text{ вольтъ.}$$

Паденіе напряженія въ проводникѣ при прохожденіи по нему тока или, что то же, электродвижущая сила, идущая на преодоленіе сопротивленія проводника, равно, какъ было указано въ началѣ отдѣла о постоянномъ токѣ, $e_p = ir = \frac{i l \rho}{s}$, гдѣ r омическое сопротивленіе проводника, пропорціональное его длинѣ l , удѣльному сопротивленію ρ и обратно пропорціональное его сѣченію s .

Въ простѣйшемъ случаѣ проводки, а именно, въ случаѣ соединенія источника электрической энергіи или распредѣлительнаго пункта сѣти съ источникомъ потребленія энергіи (черт. 102-а), сѣченіе s проводовъ, соединяющихъ



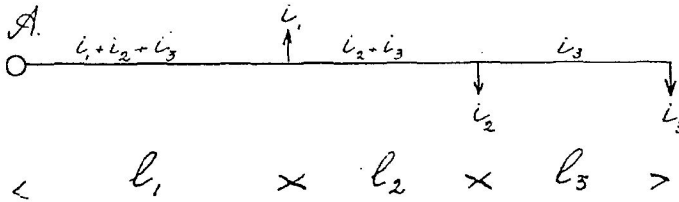
Черт. 102.

указанные пункты, опредѣляется изъ выраженія

$$s = \frac{i 2 l \rho}{e_p},$$

такъ какъ потеря напряженія e_p распредѣляется равномѣрно по длинѣ обоихъ проводовъ, т. е. по длинѣ провода l , идущаго къ

источнику потребления энергии, и провода обратного той же длины. Въ дальнейшемъ провода между источникомъ энергии и пунктомъ потребления будемъ обозначать одиночными линиями, согласно черт. 102-b, подразумевая подъ одиночной линіей два провода при постоянномъ и однофазномъ токѣ, и три провода при трехфазномъ.

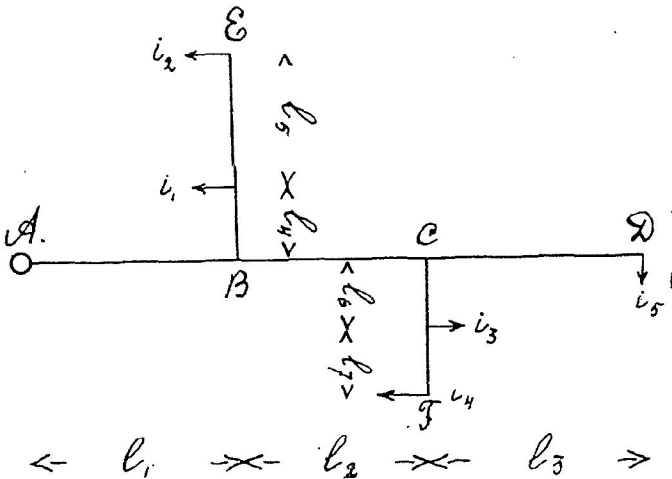


Черт. 103.

Когда къ линіи проводовъ приключено въ разныхъ мѣстахъ нѣсколько источниковъ потребления энергии (черт. 103), то сѣченіе провода опредѣляется изъ выраженія:

$$s = \frac{[(i_1 + i_2 + i_3) l_1 + (i_2 - i_3) l_2 + i_3 l_3] \cdot 2 \cdot \rho}{e_p},$$

представляющаго собою сумму потерь напряженія на отдѣльныхъ участкахъ линіи $l_1 l_2 l_3$.



Черт. 104.

Въ томъ случаѣ, когда отъ основной линіи проводовъ идутъ развѣтвленія съ включенными въ нихъ источниками потребления энергии (черт. 104), сначала опредѣляется сѣченіе s_1 проводовъ основной линіи AD , имѣя въ виду, что нагрузка линіи въ точкѣ

B равняется $i_1 + i_2$, въ точкѣ $C: i_3 + i_4$ и въ точкѣ $D: i_5$, т. е. расчетъ приводится къ предыдущему случаю.

Затѣмъ, опредѣляется сѣченіе проводовъ отвлѣтлений BE и CF , исходя изъ условія, чтобы паденіе напряженія какъ отъ A до E , такъ и отъ A до F было не болѣе e_p . Отсюда слѣдуетъ, что паденіе напряженія отъ B до E равняется e_p минусъ e_{AB} (паденіе напряженія отъ A до B), а паденіе напряженія отъ C до F равняется e_p минусъ e_{AC} (паденіе напряженія отъ A до C).

Опредѣляемъ e_{AB} и e_{AC} :

$$e_{AB} = \frac{2 l_1 (i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5) \cdot \rho}{s_1},$$

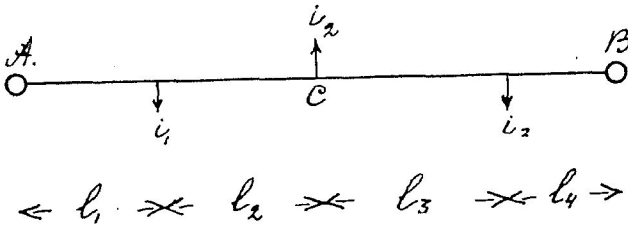
$$e_{AC} = e_{AB} + \frac{2 l_2 (i_3 + i_4 + i_5) \cdot \rho}{s_1},$$

а затѣмъ и сѣченія проводовъ s_2 s_3 въ отвлѣтленіяхъ BE и CF .

$$s_2 = \frac{2 \rho [l_4 (i_1 + i_2) + l_5 i_2]}{e_p - e_{AB}}$$

$$s_3 = \frac{2 \rho [l_6 (i_3 + i_4) + l_7 i_4]}{e_p - e_{AC}}.$$

Когда линія проводовъ питается токомъ съ двухъ концовъ A и B (черт. 105), предварительнаго расчета сѣченія этихъ проводовъ



Черт. 105.

необходимо опредѣлить какъ распредѣляется нагрузка линіи AB между питающими пунктами A и B . По аналогіи съ уравненіемъ моментовъ для силъ i_1 i_2 i_3 , приложенныхъ въ разстояніи $l_1 - l_4$ другъ отъ друга и опоръ A и B , можно написать

$$i_A (l_1 + l_2 + l_3 + l_4) = i_3 l_4 + i_2 (l_3 + l_4) + i_1 (l_2 + l_3 + l_4)$$

откуда

$$i_A = \frac{i_3 l_4 + i_2 (l_3 + l_4) + i_1 (l_2 + l_3 + l_4)}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}.$$

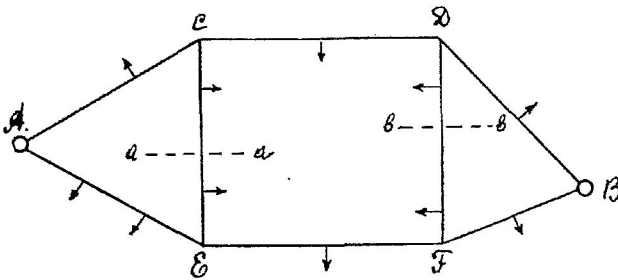
$$i_B = i_1 + i_2 + i_3 - i_A.$$

Положимъ, что въ результатѣ приведеннаго расчета оказалось, что $i_A = i_1 + \frac{1}{4} i_2$; $i_B = i_3 + \frac{3}{4} i_2$. Слѣдовательно, пунктъ C питается изъ обоихъ пунктовъ A и B . Сѣченіе s провода AB опредѣляется

$$s = \frac{\rho \cdot 2 \cdot \left[l_1 \left(i_1 + \frac{1}{4} i_2 \right) + l_2 \cdot \frac{1}{4} i_2 \right]}{e_p} =$$

$$= \frac{\rho \cdot 2 \cdot \left[l_1 \left(i_3 + \frac{3}{4} i_2 \right) + l_3 \cdot \frac{3}{4} i_2 \right]}{e_p}.$$

При болѣе сложной формѣ питательной сѣтн, напр., изображенной на черт. 106, расчетъ сѣти приводится къ предыдущему, болѣе простому случаю, разсѣкая второстепенные соединительные провода CE и DF и считая дѣйствующія въ нихъ нагрузки при-



Черт. 106.

ложенными въ узловыхъ пунктахъ C , E и D , F . Нагрузки въ C , E и D , F опредѣляются по предыдущему способу. Разсматривая далѣе линіи $ACDB$ и $AEFB$, какъ самостоятельныя, опредѣляемъ ихъ сѣченія, согласно вышеизложеннаго.

Въ сѣтяхъ большаго протяженія, питаемыхъ переменнымъ токомъ, расчетъ сѣченія проводовъ основывать на паденіи напряженія не представляется возможнымъ, такъ какъ %о паденія напряженія при переменномъ токѣ въ противоположность постоянному току ¹⁾ не совпадаетъ съ %о теряемой при этомъ мощности, благодаря наличію сдвига фазы (φ) между напряженіемъ и

¹⁾ При постоянномъ токѣ $e_p = \frac{p}{100} E$; откуда $p = \frac{100 e_p}{E}$.

Потеря мощности $e_p i = \frac{p'}{100} \cdot E i$; $p' = \frac{100 e_p i}{E i} = \frac{100 e_p}{E} = p$.

токомъ, каковой сдвигъ представляет собою величину переменную въ зависимости отъ самоиндукціи и емкости проводовъ.

Въ этомъ случаѣ въ основу расчета сѣченія проводовъ принимается потеря мощности въ проводахъ, выражаемая въ $\frac{0}{100}\%$ отъ передаваемой мощности. Если черезъ P_1 обозначить мощность въ началѣ разсматриваемаго участка линіи, а черезъ P_2 мощность въ концѣ того же участка, то

$$P_1 - P_2 = i_2 r.$$

При однофазномъ токѣ r представляет собою сопротивление двухъ проводовъ, поэтому $r = \frac{2l\rho}{s}$.

Такъ какъ $P_2 = E_2 i \cos \varphi_2$, гдѣ E_2 и φ_2 напряженіе и сдвигъ фазы въ концѣ участка, то $i = \frac{P_2}{E_2 \cos \varphi_2}$.

Подставляя значеніе i въ предыдущее равенство, получимъ

$$P_1 - P_2 = \left[E_2 \cos \varphi_2 \right]^2 \cdot \frac{2l\rho}{s}.$$

Если допустимый процентъ отъ переданной мощности, теряемой въ проводахъ, обозначить черезъ p' ; то $P_1 - P_2 = \frac{p'}{100} \cdot P_2$.

Слѣдовательно

$$\frac{p'}{100} = \frac{P_2}{(E_2 \cos \varphi_2)^2} \cdot \frac{2l\rho}{s},$$

откуда

$$s = \frac{2 P_2 l \rho}{(E_2 \cos \varphi_2)^2 \frac{p'}{100}}.$$

Для трехфазнаго тока имѣемъ

$$3 i_2 r = \frac{p'}{100} P_2,$$

гдѣ r сопротивленіе одиночнаго провода.

Сила тока

$$i = \frac{P_2}{E_2 \sqrt{3} \cos \varphi_2}.$$

Подставляя i въ предыдущее равенство, получимъ

$$s = \frac{P_2 l \rho}{(E_2 \cos \varphi_2)^2 \frac{p'}{100}},$$

При длинѣ проводовъ, не превышающей нѣсколькихъ километровъ, самоиндукціей и емкостью проводовъ можно пренебречь. Въ такомъ случаѣ сдвигъ фазы φ можно считать постояннымъ вдоль всей линіи проводовъ и сѣченія проводовъ при однофазномъ токѣ (s_{od}) и при постоянномъ токѣ (s_{nc}), въ случаѣ равенства напряженія между проводами и $\%$ потери мощности, относятся другъ къ другу, какъ $1 : \cos \varphi$:

$$\frac{s_{od}}{s_{nc}} = \frac{2 Pl \rho}{(E \cos \varphi)^2 \frac{p}{100}} \cdot \frac{2 Pl \rho}{E^2 \frac{p}{100}} = \frac{1}{\cos^2 \varphi}.$$

Соотношеніе сѣченій въ тѣхъ же условіяхъ при трехфазномъ токѣ (считая E —напряженіе между линейными проводами) и при постоянномъ токѣ выражается

$$\frac{s_{mp}}{s_{nc}} = \frac{1}{2 \cos^2 \varphi}.$$

Въ виду этого расчетъ проводовъ въ сѣтяхъ не очень большого протяженія ведется какъ для постоянного тока и затѣмъ полученныя сѣченія проводовъ измѣняются для однофазнаго тока въ отношеніи $\frac{1}{\cos^2 \varphi}$, а для трехфазнаго тока въ отношеніи $\frac{1}{2 \cos^2 \varphi}$.

При проектированіи линіи передачи электрической энергіи на большія разстоянія, какъ на примѣръ, отъ центральной электрической станціи къ подстанціямъ, обслуживающимъ электрическую желѣзнодорожную тягу, рѣшающее значеніе на выборъ допустимаго процентнаго отношенія потери мощности въ проводахъ $\frac{p'}{100}$

и коэффициента полезнаго дѣйствія передачи $\eta = \frac{P_2}{P_1}$, свя-

заннаго съ $\frac{p'}{100}$ уравненіемъ: $\frac{p'}{100} = \frac{1 - \eta}{\eta}$, играетъ рѣшающее значеніе экономическая сторона вопроса. Съ уменьшеніемъ η соотвѣтственно возрастаетъ p' и уменьшается сѣченіе проводовъ, а, слѣдовательно, уменьшаются ежегодные расходы, связанные съ затратой на мѣдь проводовъ и устройство линіи передачи. Одновременно съ этимъ, однако, возрастаетъ количество энергіи, теряемой въ проводахъ, а вмѣстѣ съ тѣмъ растутъ расходы на производство теряемой энергіи и потеря чистой прибыли, которую можно было бы получить отъ утилизаціи теряемой энергіи. Обо-

значимъ ресходы первой категоріи черезъ A_1 , а расходы второй— черезъ A_2 .

$$A_1 = \frac{\alpha}{\frac{1}{\eta} - 1} \quad ^1)$$

$$A_2 = \beta \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \quad ^1)$$

Наивыгоднѣйшее значеніе η опредѣляется изъ условія, чтобы сумма $A_1 + A_2 = \frac{\alpha}{\frac{1}{\eta} - 1} + \beta \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)$ была наименьшей. Прирав-

нивая O производную по η второй половины уравненія, находимъ, что $\frac{\rho'}{100} = \frac{1}{\eta} - 1 = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}$.

Вліяніе емкости и самоиндукціи проводовъ на паденіе напряженія и сдвигъ фазы между E и i въ линіяхъ передачи значительнаго протяженія и высокаго напряженія (около 50.000 вольтъ и выше) весьма значительно. Для опредѣленія напряженія E_1 , силы тока i_1 и сдвига фазы φ_1 въ началѣ линіи при заданныхъ значеніяхъ E_2 i_2 φ_2 въ концѣ линіи можетъ быть примѣненъ способъ построенія векторной діаграммы холостого хода и короткаго замыканія ²⁾. Исходя изъ предположенія равномернаго распредѣ-

$$^1) \quad \alpha = \frac{\delta P_2 l^2 \gamma k \varepsilon \rho 1000}{[E_2 \cos \varphi_2]^2}; \quad \beta = P_2 T (k_1 + k_2)$$

гдѣ P_2 —наибольшая нагрузка въ kw на концѣ линіи передачи.

$\cos \varphi_2$ —коэффициентъ мощности тамъ же.

E_2 —напряженіе между проводами тамъ же.

l —длина линіи передачи въ метрахъ.

k —стоимость 1 кгр. мѣди.

γ —вѣсъ 1000 куб. мм. мѣди въ кгр.

ε —ежегодный расходъ на проценты, амортизацію и погашеніе стоимости проводовъ.

δ —при однофазномъ токѣ = 4, при трехфазномъ 3.

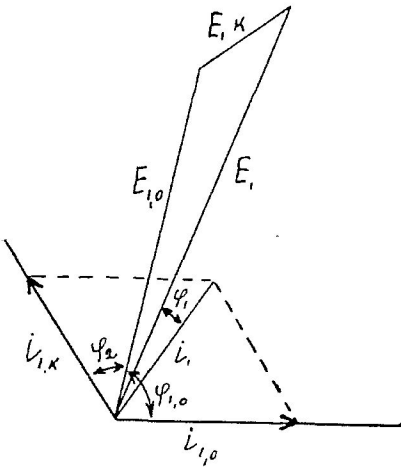
T —число часовъ въ году, въ теченіе которыхъ энергія въ проводахъ, при условіи, что нагрузка поддерживалась бы въ теченіе этихъ часовъ P_2 , достигаетъ дѣйствительной годовой потери энергіи при перемѣнной нагрузкѣ.

k_1 —стоимость производства на центральной станціи 1 kw часа.

k_2 —чистая прибыль отъ утилизаціи 1 kw-часа.

²⁾ Способъ изложенъ у Kittler'a „Allgemeine Elektrotechnik“ Band II, стр. 236—264 и у W. Petersen'a „Hochspannungstechnik“, стр. 310.

ленія самоіндукції и емкости проводовъ ¹⁾ вдоль линіи, можно опредѣлить напряженіе, силу тока и сдвигъ фазы въ началѣ линіи, какъ при холостомъ ходѣ линіи (линія подъ напряженіемъ безъ нагрузки) E_{10} i_{10} φ_{10} , такъ и при короткомъ замыканіи E_{1k} i_{1k} φ_{1k} . Такъ какъ напряженіе E_{1k} при короткомъ замыканіи идетъ на преодоленіе омическаго и индуктивнаго сопротивленія проводовъ при заданной нагрузкѣ, то геометрическая сумма E_{1k} и E_{10} даетъ напряженіе E_1 въ началѣ линіи при заданной нагрузкѣ. Сила тока i_{10} при холостомъ ходѣ представляетъ собой зарядный токъ проводовъ, благодаря ихъ емкостн. Геометрическая сумма i_{10} и i_{1k} даетъ силу тока i_1 при заданной нагрузкѣ и напряженіе E_1 . Векторная діаграмма (черт. 107) строится слѣдующимъ образомъ.



Черт. 107.

Подъ угломъ φ_{10} направо отъ E_{10} откладывается векторъ тока i_{10} , а подъ угломъ φ_2 влѣво векторъ тока i_{1k} . Изъ конца вектора E_{10} подъ угломъ φ_{1k} къ вектору i_{1k} откладывается векторъ E_{1k} . Величины E_1 i_1 φ_1 находятся непосредственно изъ діаграммы.

Разстояніе между воздушными проводами въ линіяхъ высокаго напряженія опредѣляется въ зависимости отъ такъ называемаго критическаго напряженія, при которомъ изолирующая способность воздуха оказывается недостаточной и вслѣдствіе этого между проводами на-

чинаетъ происходить черезъ воздухъ тихій разрядъ, характеризующійся свѣченіемъ проводовъ. При дальнѣйшемъ возрастаніи напряженія между проводами изоляція воздуха окончательно пробивается и происходитъ короткое замыканіе въ видѣ искрового разряда. Тихій разрядъ сопряженъ съ утечкой эне-

¹⁾ Коэффициентъ самоиндукції воздушнаго провода на 1 км.

$$L = 2,10^{-4} \left(\lg \frac{2a}{d} + 0,25 \right) \text{ Генри.}$$

Коэффициентъ емкости воздушнаго провода на 1 км.

$$C = \frac{1}{18} \frac{1}{\lg \frac{2a}{d}} 10^{-6} \text{ Фарадъ,}$$

гдѣ a —разстояніе между проводами, d —діаметръ проводовъ.

гії черезъ воздухъ. Отношеніе критическаго напряженія къ рабочему напряженію въ проводахъ называется коэффициентомъ безопасности линіи передачи электрической энергіи и на существующихъ электрическихъ установкахъ высокаго напряженія колеблется въ среднемъ отъ 1,2 до 1,8. Критическое напряженіе зависитъ отъ плотности электрическихъ линій силъ (электрическаго поля) на поверхности проводовъ и поэтому увеличивая радіусъ r проводовъ при томъ же напряженіи между проводами, можно повысить критическое напряженіе. Того же результата можно достигнуть также путемъ увеличенія разстоянія a между проводами ¹⁾.

¹⁾ Для однофазнаго тока критическое напряженіе E_{kp} выражается (Petersen „Hochspannungstechnik“, стр. 302)

$$E_{kp} = \delta \cdot 2r \lg \operatorname{nat} \frac{a}{r},$$

гдѣ δ —сопротивленіе воздуха пробиванію.

Для трехфазнаго тока

$$E_{kp} = \delta \sqrt{3} \cdot r \lg \operatorname{nat} \frac{a}{r}.$$

Электрическое освѣщеніе.

Наиболѣе распространенные въ настоящее время источники освѣщенія распадаются на двѣ группы: лампы накаливанія и дуговые фонари. Лампы накаливанія состоятъ изъ нитей угольныхъ или металлическихъ, помѣщенныхъ въ стекляныхъ грушахъ съ разрѣженнымъ воздухомъ. При прохожденіи по нитямъ тока, нити накаливаются и испускаютъ свѣтъ. Въ дуговыхъ фонаряхъ источникомъ свѣта служитъ вольтовая дуга, образующаяся между электродами дугового фонаря при пропусканіи черезъ него тока.

Лампы накаливанія.

Лампы накаливанія съ угольной нитью изготовляются силой свѣта отъ 5 до 50 свѣчей для напряженія до 250 вольтъ (нормально 110—120 вольтъ). Расходъ энергіи въ этихъ лампахъ, отнесенный къ ихъ силѣ свѣта, составляетъ въ среднемъ 3—3,5 ватта на свѣчу. Срокъ службы угольныхъ лампъ составляетъ въ среднемъ 600 часовъ.

Изъ лампъ съ металлическими нитями наибольшее распространеніе имѣютъ въ настоящее время лампы съ нитями танталовой, вольфрамой и осрамовой (соединеніе вольфрама съ осміемъ).

Танталовыя лампы наиболѣе пригодны для постоянного тока. Онѣ изготовляются силой свѣта до 50 свѣчей и для напряженій до 240 вольтъ. Расходъ энергіи составляетъ при постоянномъ токъ около 1,5 ватта на свѣчу, при переменномъ 2,1 — 2,3 ватта на свѣчу. Срокъ службы 600—800 часовъ. Вольфрамовыя и осрамовыя лампы изготовляются для напряженій до 260 вольтъ и силой свѣта для внутренняго освѣщенія отъ 10 до 100 свѣчей, а для наружнаго отъ 200 до 1.000 свѣчей. Средній расходъ энергіи составляетъ, какъ при постоянномъ, такъ и при переменномъ токъ,

для первой группы 1—1,2 ватта на свѣчу, для второй группы 0,8 ватта на свѣчу. Сила свѣта лампъ по мѣрѣ ихъ горѣнія понижается очень незначительно, и поэтому лампы употребляются до разрушенія ихъ нитей. Средній срокъ службы этихъ лампъ составляетъ 1.000 часовъ и колеблется отъ 600 до 2.000 часовъ.

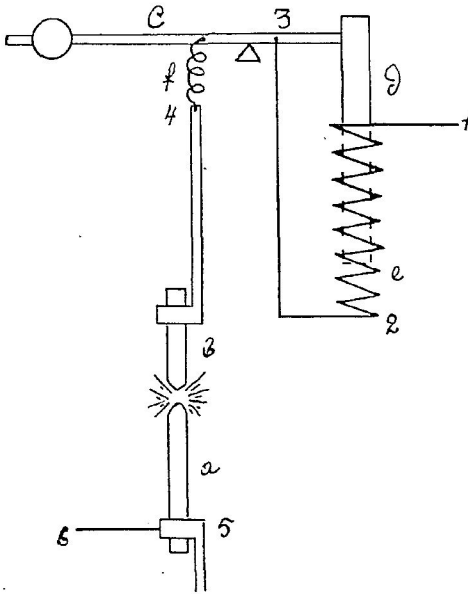
Дуговые фонари.

Для образованія вольтовой дуги между электродами дугового фонаря необходимо электроды сдвинуть, т. е. замкнуть цѣпь дугового фонаря, и по установленіи тока раздвинуть электроды. Въ пространствѣ между раскаленными, благодаря току, концами электродовъ образуются изъ матеріала электродовъ газы и пары, которые подѣйствіемъ высокой температуры іонизируются и служатъ проводящею средою, поддерживающею токъ между электродами. При питаніи вольтовой дуги постояннымъ токомъ на положительномъ электродѣ (анодѣ) образуется кратеръ, температура котораго достигаетъ 3.600° С. и который даетъ поэтому наибольшую силу свѣта въ дуговомъ фонарѣ. Отрицательный электродъ имѣетъ коническую форму. Температура его достигаетъ 2.500° С. При питаніи вольтовой дуги переменнымъ токомъ оба электрода сохраняютъ одинаковую коническую форму. Что касается температуры дуги, то предполагаютъ что она достигаетъ 4000° С.

Соотношеніе между длиной вольтовой дуги l и напряженіемъ E между электродами выражается для постоянного тока приближенной формулой $E = 39 + (2 \text{ до } 3) l$, гдѣ l выражено въ миллиметрахъ. Для переменнаго тока $E = 20 + (2 \text{ до } 3) l$. Такъ, для наиболѣе употребительныхъ силъ постоянного тока отъ 6 до 14 амперъ и l отъ 2 до 4 мм., E равняется отъ 40 до 50 вольтъ. При переменномъ токѣ E около 30 в. Для обезпеченія силы свѣта въ дуговомъ фонарѣ необходимо поддерживать постоянство силы тока и напряженія между электродами. Такъ какъ одинъ изъ этихъ факторовъ является для данной цѣпи постояннымъ, благодаря регулировкѣ или тока или напряженія въ динамо-машинѣ, питающей цѣпь, то въ самомъ фонарѣ необходимо регулировать другой изъ упомянутыхъ двухъ факторовъ. Для этой цѣли примѣняется автоматическое регулированіе при помощи электромагнитныхъ катушекъ, дѣйствующихъ на передаточные механизмы путемъ втягиванія желѣзныхъ сердечниковъ и т. п. Въ зависимости отъ включенія обмотокъ названныхъ катушекъ послѣдова-

тельно съ вольтовой дугой, параллельно ей или частью послѣдовательно, частью параллельно, дуговые фонари дѣлятся на фонари съ послѣдовательною регулировкой, шунтовые и дифференціальные.

На черт. 108 изображена схема включенія дугового фонаря съ послѣдовательною регулировкой. Нижний электродъ *a* неподвиженъ. Верхний электродъ *b* подвиженъ и стремится сбли-



Черт. 108.

зиться съ нижнимъ электродомъ подъ дѣйствіемъ силы тяжести или пружины. Съ другой стороны соленоидъ *e* при прохожденіи по его обмоткѣ тока втягиваетъ сердечникъ *d*, приподымаетъ связанный съ *d* рычагъ *c* и черезъ посредство передаточнаго механизма *f* раздвигаетъ электроды. Такимъ образомъ, съ усиленіемъ тока, проходящаго по цѣпи дугового фонаря 123456, электроды раздвигаются, съ ослабленіемъ же тока электроды сдвигаются. Если постоянную силу, стремящуюся сдвинуть электроды, обозначить черезъ f_0 , число

витковъ соленоида черезъ n , силу тока (въ абсолютныхъ единицахъ) черезъ I и α коэффициентъ пропорціональности, то для нормальныхъ условій горѣнія дугового фонаря сила втягиванія соленоида $\alpha \cdot I \cdot n$ должна уравниваться съ силой f_0 . Отсюда $I = \frac{f_0}{\alpha n} = \text{const}$, т. е. фонарь регулируетъ на постоянную силу тока.

На черт. 109 изображена схема шунтового фонаря.

Въ этомъ случаѣ раздвиженіе электродовъ производится при помощи пружины, а сближеніе электродовъ помощью рычага *c* и механизма *f* при втягиваніи соленоидомъ *e* сердечника *d*. Электроды *a* и *b* включены въ главную цѣпь 12345, а обмотка соленоида *e* въ отвѣтвленную цѣпь 26784, параллельную главной. Съ увеличеніемъ разстоянія между электродами, напр., вслѣдствіе ихъ обгоранія, сопротивление цѣпи 12345 увеличивается. А такъ какъ токи распредѣляются въ параллельныхъ вѣтвяхъ обратно

силу тока и сопротивление соленоида e_2 . Согласно вышесказанного $\alpha n_1 I_1 = n_2 I_2$.

Такъ какъ

$$I_2 = \frac{E}{r_2},$$

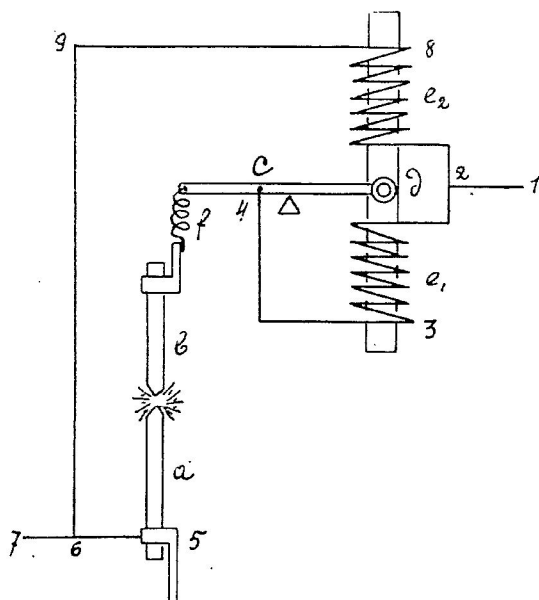
то

$$\alpha n_1 I_1 = n_2 \frac{E}{r_2}.$$

$$\frac{E}{I_1} = \alpha \frac{n_1}{n_2} \cdot r_2 = \text{const.}$$

т. е. въ дифференціальномъ дуговомъ фонарѣ автоматически поддерживается постояннымъ сопротивленіе вольтовой дуги въ ея цѣломъ.

Дуговые фонари съ послѣдовательной регулировкой вообще примѣняются рѣдко. Включеніе ихъ возможно лишь одиночное.



Черт. 110.

Дуговые шунтовые и дифференціальные фонари пригодны какъ для одиночнаго включенія, такъ и для послѣдовательнаго включенія нѣсколькихъ фонарей. Лучшими по регулировкѣ являются дифференціальные фонари.

Электроды для обыкновенныхъ дуговыхъ фонарей изготовляются изъ прессованнаго углерода, при чемъ при постоянномъ токъ для положительнаго электрода (анода) угли примѣняются въ 2 раза большаго діаметра, нежели для отрицательнаго

(катода), такъ какъ анодъ сгораетъ быстрѣе катода.

При переменномъ токъ угли одинаковаго сѣченія. Для такъ называемыхъ пламенныхъ (съ цвѣтной окраской свѣта) дуговыхъ фонарей электроды снабжаются внутри фитилями изъ различнаго рода металлическихъ солей. Угли послѣдняго рода при той же силѣ тока даютъ силу свѣта въ $3\frac{1}{2}$ раза большую, нежели сплошные угли. Выдѣленіе большого количества газовъ при горѣніи затрудняетъ ихъ примѣненіе въ закрытыхъ помѣщеніяхъ.

Дуговые фонари изготовляются съ открытой вольтовой дугой, т. е. горящей въ воздухѣ, и съ закрытой вольтовой дугой, доступъ воздуха къ коей затрудненъ. Въ первомъ случаѣ число часовъ горѣнія углей составляетъ 6—16 часовъ, а во второмъ — 100—150 часовъ. Фонари съ закрытой вольтовой дугой требуютъ напряженія въ 75—80 вольтъ, т. е. почти въ два раза большаго, чѣмъ фонари съ открытой вольтовой дугой. Относительный расходъ энергіи, т. е. число ваттъ на свѣчу, въ обыкновенныхъ дуговыхъ фонаряхъ съ открытой вольтовой дугой, при постоянномъ токъ составляетъ отъ 0,92 до 0,63 при средней полусферической силѣ свѣта фонаря отъ 360 до 1.305 свѣчей. При переменномъ токъ для силъ свѣта въ 180—486 свѣчей относительный расходъ соотвѣтственно составляетъ 1,57—1,07.

Для дуговыхъ фонарей съ закрытой вольтовой дугой относительный расходъ больше соотвѣтственно на 25—30% при постоянномъ токъ и на 75—100% при переменномъ.

Въ пламенныхъ дуговыхъ фонаряхъ относительный расходъ энергіи составляетъ при постоянномъ токъ 0,22 ваттъ при силѣ свѣта до 4.000 свѣчей, при переменномъ токъ около 0,25—0,4 ваттъ при силѣ свѣта до 1.700.

Къ числу дуговыхъ фонарей относится ртутная лампа, состоящая изъ стеклянной трубки съ разрѣженнымъ воздухомъ, анодомъ въ которомъ служитъ желѣзный электродъ, а катодомъ ртутный. Если лампу подъ напряженіемъ наклонить такимъ образомъ, чтобы ртуть, переливаясь по трубкѣ, коснулась анода, то токъ въ лампѣ замкнется. При поворотѣ лампы въ нормальное положеніе ртуть сосредоточится у катода, а въ лампѣ образуются пары ртути, которые даютъ свѣтъ, лишенный красныхъ лучей. Въ виду этой особенности ртутныхъ лампъ онѣ примѣняются лишь для специальныхъ цѣлей.

Телеграфія.

Задачей телеграфіи является осуществленіе оыстрыхъ письменныхъ сношеній между пунктами, удаленными на большія другъ отъ друга разстоянія. Въ настоящее время это достигается двоякимъ путемъ. Во-первыхъ, помощью электрическаго тока, передаваемого по проводу, соединяющему между собою передающую и принимающую станціи (телеграфированіе по проводамъ) и, во-вторыхъ, помощью электромагнитныхъ волнъ, излучаемыхъ передающее станцією и распространяющихся вдоль земной поверхности безъ помощи проводовъ (телеграфированіе безъ проводовъ или, радіотелеграфія, т. е. телеграфированіе помощью излученія).

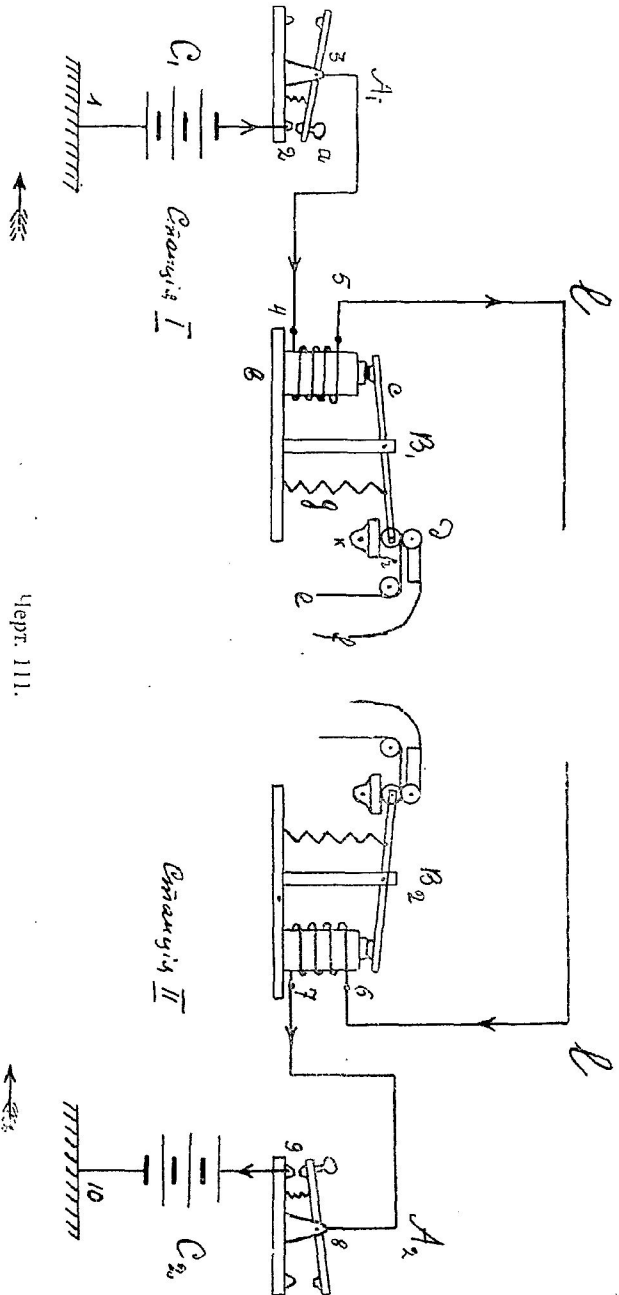
Телеграфированіе по проводамъ.

Передача отдѣльныхъ буквъ, а, слѣдовательно, и словъ производится или помощью условныхъ знаковъ, точекъ и тире, получаемыхъ на лентѣ пріемнаго аппарата и отвѣчающихъ въ различныхъ своихъ комбинаціяхъ отдѣльнымъ буквамъ алфавита (азбука Морзе) или помощью отпечатыванія на лентѣ пріемнаго аппарата готовыхъ буквъ. И тотъ, и другой способъ основанъ на дѣйствиіи электрическаго тока, появляющагося въ цѣпи, образуемой проводомъ между переговаривающимися станціями и землей, какъ обратнымъ проводомъ, когда цѣпь замыкается. Въ области желѣзнодорожнаго дѣла нашли себѣ примѣненіе, главнымъ образомъ, телеграфные аппараты системы Морзе и Уитстона, осуществляющіе телеграфную передачу по азбукѣ Морзе, и аппараты Юза —буквопечатающіе.

Система Морзе.

Аппаратами Морзе, отличающимися большой простотой, оборудованы всѣ желѣзнодорожныя станціи и ими обслуживается какъ вся мѣстная служебная корреспонденція, такъ и регулированіе на большинствѣ дорогъ движенія поѣздовъ.

Передаточный аппарат Морзе состоит из ключа *A* (черт. 111), помощью которого размыкается или замыкается цепь 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 1. Приемный аппарат *B* состоит из электромагнитов *b*, обмотка которых включена в упомянутую цепь, рычага *c* и часового механизма, приводящего во вращение ролик *d*, который, в свою очередь, передвигает бумажную ленту *ef*. Когда цепь 1—10—1 разомкнута, правый конец рычага *c* оттягивается вниз пружиной *y*, при чем колесо *h* рычага *c* опускается в чашечку *k* с краской. При замыкании цепи электромагнит *b* намагничивается и притягивает левый конец рычага *c*, вследствие чего правый конец последнего подымается и колесо *h*, упираясь в ролик *d*, чертит окрашенным своим ободом на ленте *ef* знак. В зависимости от продолжительности нажатия ключа *A* на ленте получается точка или тире.

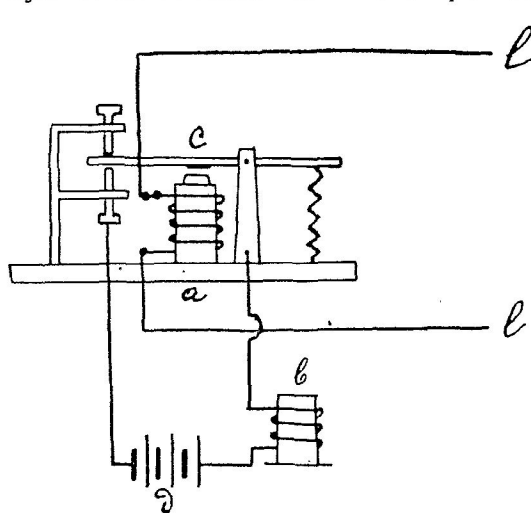


Черт. 111.

На черт. 111 представлена простѣйшая схема включенія приборовъ, примѣняемая на желѣзныхъ дорогахъ, а именно схема, при которой цѣпь нормально замкнута (схема постоянного тока). Для телеграфированія необходимо сначала приподнять ключъ за кнопку *a* и затѣмъ уже начать посылать въ линію импульсы тока различной продолжительности путемъ соотвѣтствующихъ замыканій контакта 2 (9).

Почтово-телеграфное вѣдомство примѣняетъ схему включенія аппаратовъ, въ которой цѣпь 1—10—1 нормально разомкнута (схема рабочего тока).

Включеніе пріемныхъ приборовъ непосредственно въ цѣпь линейнаго провода, какъ то показано на черт. 111, возможно при сравнительно небольшомъ разстояніи между станціями. Съ увеличеніемъ разстоянія между ними возрастаетъ сопротивленіе линейнаго провода *ll*, а, слѣдовательно, и цѣпи, вслѣдствіе чего, при данномъ напряженіи батареи *C*, намагничиваніе электромагнитовъ пріемнаго аппарата можетъ оказаться недостаточнымъ для притягиванія съ надлежащей силой рычага *c* и полученія отчетливыхъ знаковъ. Для устраненія этого въ линейную цѣпь *ll* включаются электромагниты прибора, называемаго



Черт. 112.

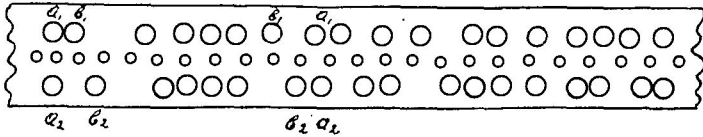
релѣ (черт. 112) и состоящаго изъ электромагнитовъ *a* и якоря *c*, который замыкаетъ мѣстную цѣпь съ батареей *d* и электромагнитами *b* пріемнаго аппарата.

Нормальная скорость телеграфированія на аппаратахъ Морзе опредѣляется въ 10 словъ или 60 буквъ въ минуту. Такая скорость передачи для телеграфныхъ линій, соединяющихъ болѣе или менѣе удаленные пункты съ большой работой, является

недостаточной и поэтому такія линіи оборудуются быстродействующими аппаратами. Къ ихъ числу принадлежатъ аппараты Уитстона.

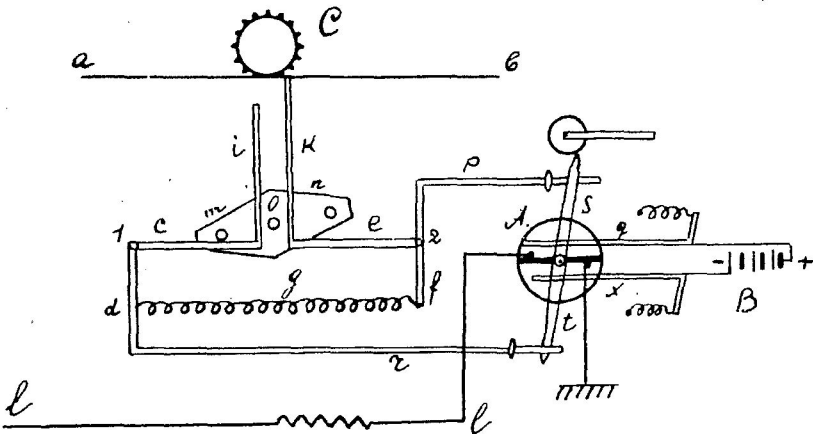
Система Уитстона.

При этой системѣ телеграммы готовятся для передачи путемъ пробиванія на бумажной лентѣ въ три ряда отверстій (черт. 113), изъ коихъ средній рядъ служитъ для передвиженія ленты помощью зубчатого колеса *C* (черт. 114), входящего своими



Черт. 113.

зубами въ упомянутыя отверстія. Отверстія, пробиваемыя въ крайнихъ рядахъ, служатъ для передачи знаковъ Морзе, при чемъ при расположеніи двухъ отверстій одно подъ другимъ, напр., $a_1 a_2$, передается точка, при расположеніи двухъ отверстій наискось, напр., $b_1 b_2$, передается тире. Отверстія верхняго ряда служатъ для посылки въ линію импульсовъ тока одного направленія,



Черт. 114.

а нижнія отверстія для посылки импульсовъ тока обратнаго направленія. Приёмный аппаратъ состоитъ изъ электромагнита съ двойнымъ якоремъ. При прохожденіи по обмоткѣ электромагнита токовъ перваго направленія, якорь перемѣщается въ одну сто-

рону, приводя въ соприкосновеніе перо съ движущейся бумажной лентой, вслѣдствіе чего на лентѣ начинается чертиться знакъ. При появленіи въ обмоткѣ электромагнита токовъ обратнаго направленія якорь отклоняется въ другую сторону и тѣмъ прерываетъ начертаніе знака на лентѣ. Въ случаѣ расположенія отверстій одно подъ другимъ $a_1 a_2$, за положительнымъ импульсомъ тока сейчасъ же слѣдуетъ отрицательный и поэтому перо успѣваетъ нанести на лентѣ только точку. Въ случаѣ же расположенія отверстій наискось $b_1 b_2$ между положительнымъ и отрицательнымъ импульсомъ проходитъ больший промежутокъ времени, достаточный для нанесенія на приѣмной лентѣ черты.

Передаточный аппаратъ состоитъ (черт. 114) изъ двухъ колѣнчатыхъ рычаговъ cd и ef , вращающихся на шарнирахъ 1 и 2. Плечи d и f стянуты пружиной g . На концѣ плечъ c и e укрѣплены иглы i и k , которыя, подъ дѣйствіемъ пружины g , стремятся подняться вверхъ и пройти сквозь крайніе ряды отверстій на лентѣ ab . Коромысло mn находится въ постоянномъ колебательномъ движеніи вокругъ оси O и штифтами m и n поочередно опускаетъ внизъ плечи c и e вмѣстѣ съ иглами i и k . Когда игла k при своемъ подъемѣ встрѣчаетъ отверстіе въ лентѣ ab , то, пройдя черезъ него, даетъ возможность повернуться рычагу ef , который черезъ посредство стержня p поворачиваетъ рычагъ st коммутатора A . Коммутаторъ A состоитъ изъ двухъ изолированныхъ другъ отъ друга полукруглыхъ пластинъ, изъ которыхъ одна соединена съ линейнымъ проводомъ, другая съ землей. При указанномъ поворотѣ коммутатора линейный проводъ ll соединяется черезъ верхнюю половину коммутатора п контактную полосу q съ положительнымъ полюсомъ батареи B , а отрицательный полюсъ черезъ контактъ x и нижнюю половину коммутатора съ землей, вслѣдствіе чего въ линію посылается положительный импульсъ тока и въ приѣмномъ аппаратѣ перо начинаетъ чертить на лентѣ знакъ. Если затѣмъ игла i при своемъ движеніи вверхъ встрѣтитъ отверстіе въ лентѣ ab , то, пройдя черезъ отверстіе, дастъ возможность повернуться рычагу cd , который, въ свою очередь, повернетъ коммутаторъ въ обратную сторону, вслѣдствіе чего установится соединеніе линейнаго провода съ отрицательнымъ полюсомъ батареи, а земли съ положительнымъ полюсомъ и въ линію направится отрицательный импульсъ тока, который въ приѣмномъ аппаратѣ прекратитъ черченіе знака на лентѣ.

Скорость передачи достигаетъ 120—130 словъ въ минуту.

Система Юза.

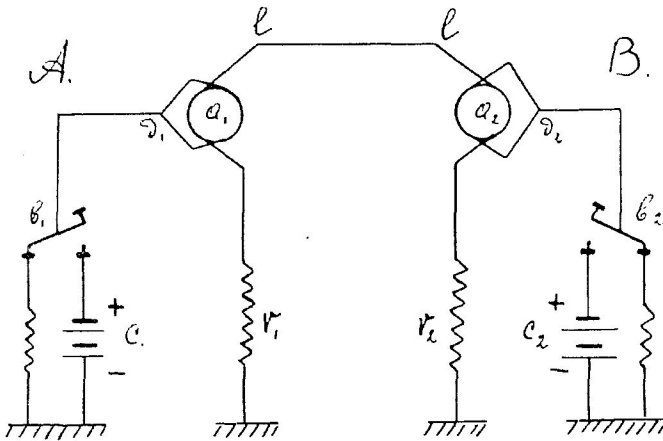
Аппаратъ Юза принадлежитъ, какъ выше было упомянуто, къ буквопечатающимъ приборамъ. Дѣйствіе его, основано на синхронномъ вращеніи контакта на поверхности диска въ передаточномъ аппаратѣ и буквеннаго колеса, съ расположенными на его окружности буквами въ пріемномъ аппаратѣ. Въ дискѣ передаточнаго аппарата сдѣланы вблизи окружности диска радіальные прорѣзы, сквозь которыя подымаются при нажатіи соотвѣтствующей клавиши, отвѣчающей передаваемой буквѣ, пальцы. При соприкосновеніи вращающагося контакта съ выдвинувшимся пальцемъ, въ линію посылается токъ, который въ пріемномъ аппаратѣ, помощью электромагнита и печатающей оси, прижимаетъ къ периферіи буквеннаго колеса ленту. Такъ какъ пальцы по окружности диска въ передаточномъ аппаратѣ, отвѣчающіе буквамъ клавиатуры, расположены въ томъ же порядкѣ, что и буквы на окружности буквеннаго колеса и такъ какъ контактъ вращается синхронно съ буквеннымъ колесомъ, то въ моментъ прижатія въ пріемномъ аппаратѣ ленты къ буквенному колесу, подъ лентой окажется и отпечатается какъ разъ та буква, которая была передана передаточнымъ аппаратомъ, благодаря соприкосновенію вращающагося контакта съ выдвинутымъ пальцемъ.

Скорость передачи на аппаратахъ Юза опредѣляется въ 25 словъ въ минуту.

Многократная телеграфія.

Стремленіе повысить использование телеграфныхъ проводовъ обусловило появленіе различнаго рода системъ многократной телеграфіи, дающихъ возможность передавать по одному и тому же проводу одновременно нѣсколько телеграммъ. Передача по проводу двухъ телеграммъ одного направленія носитъ названіе дуплексовой телеграфіи, передача двухъ телеграммъ навстрѣчу другъ другу—дуплексовой телеграфіи. Наибольшее примѣненіе получила, главнымъ образомъ, дуплексовая телеграфія, которая осуществляется преимущественно или при помощи дифференціального способа включенія телеграфныхъ аппаратовъ или при помощи ихъ включенія по способу моста Уитстона. При первомъ способѣ электромагниты a_1 a_2 пріемныхъ аппаратовъ снабжаются двумя одинаковыми по сопротивленію и числу витковъ обмотками, но противоположнаго направленія (черт. 115). Общій конецъ обмотокъ

соединены съ ключомъ b , другіе концы обмотокъ соединены: первой обмотки съ линіей ll , а второй обмотки съ сопротивленіемъ r , которое равно сопротивленію линіи вмѣстѣ съ сопротивленіемъ приѣмной цѣпи сосѣдней станціи. При подачѣ сигналовъ станціей A , токъ i изъ батареи c_1 черезъ ключъ b_1 направляется въ обмотки электромагнита a_1 и, раздѣлившись въ точкѣ a_1 на двѣ равныя части, благодаря равенству сопротивленій цѣпей линейной и мѣстной съ сопротивленіемъ r_1 , проходитъ по обѣимъ обмоткамъ въ противоположныхъ направленіяхъ. Токъ,

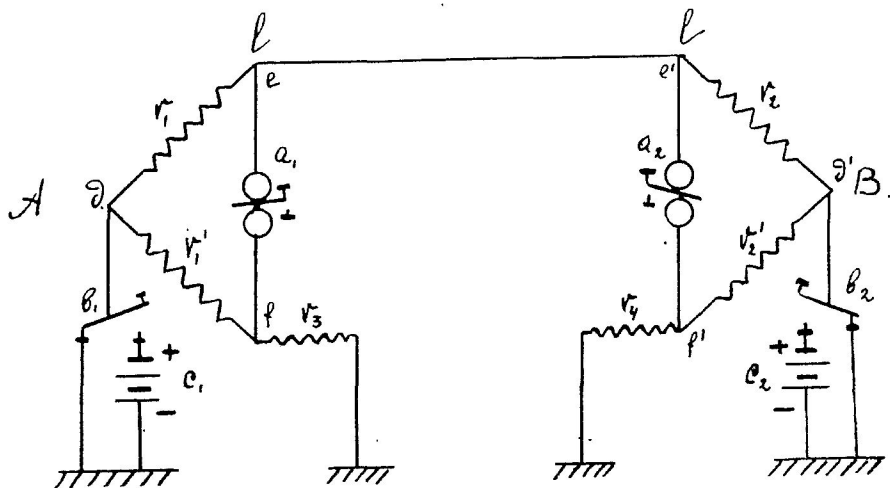


Черт. 115.

проходящій по второй обмоткѣ въ размѣрѣ $1/2$, направляется затѣмъ черезъ r_1 въ землю и оттуда къ батарее c_1 . Токъ, проходящій по первой обмоткѣ въ размѣрѣ также $1/2$, направляется въ линію ll . Такъ какъ дѣйствіе амперъ-витковъ обѣихъ обмотокъ электромагнита a_1 равное и взаимнопротивоположное, то электромагнитъ a_1 не притянетъ своего якоря и приѣмный аппаратъ станціи A останется въ покоѣ. На станціи B токъ изъ линіи ll поступаетъ въ первую обмотку электромагнита a_2 и, пройдя ее, направляется, главнымъ образомъ, черезъ ключъ b_2 въ землю и оттуда къ батарее c_2 , а частью, пройдя по второй обмоткѣ и сопротивленію r_2 , идетъ въ землю и возвращается къ батарее c_1 . Такъ какъ токи въ обѣихъ обмоткахъ въ этомъ случаѣ проходятъ въ одномъ направленіи, то электромагнитъ a_2 приходитъ въ дѣйствіе и вызываетъ соотвѣтствующій знакъ въ приѣмномъ аппаратѣ станціи B . Когда телеграфируетъ только станція B , то ея приѣмный аппаратъ, согласно изложеннаго, не отзывается, а приходитъ въ дѣйствіе приѣмный аппаратъ на станціи A . При работѣ обѣихъ

станцій одночасно, въ цѣпи, составляемой линіей ll , первыми обмотками электромагнитовъ $a_1 a_2$ и землей, тока нѣтъ, такъ какъ батареи c_1 и c_2 включены противоположными полюсами и поэтому ихъ дѣйствіе взаимно компенсируется. Въ мѣстныхъ же цѣпяхъ (батарея, вторая обмотка электромагнита, сопротивление r и земля) токъ циркулируетъ на обѣихъ станціяхъ и вызываетъ дѣйствіе приемныхъ приборовъ.

Схема включенія аппаратовъ по способу моста Уитстона показана на черт. 116, $a_1 a_2$ — электромагниты приемныхъ аппаратовъ;



Черт. 116.

$r_3 r_1 r_1' r_2 r_2' r_4$ — искусственные сопротивления, $b_1 b_2$ — ключи, $c_1 c_2$ — батареи. Сопротивления подобраны такимъ образомъ, что $r_1 = r_1'$, $r_2 = r_2'$ и $r_3 = r_4$ = сопротивленію линіи ll + сопротивленіе цѣпи приемнаго прибора сосѣдней станціи. При подачѣ сигналовъ одновременно только одной станціей, приемный аппаратъ передающей станціи не отзывается, такъ какъ токъ, выйдя, на примѣръ, изъ батареи c_1 (передаетъ станція A) развѣтвляется въ точкѣ d на двѣ равныя части, благодаря равенству сопротивленій линейной цѣпи ll и мѣстной съ сопротивленіемъ r_3 . Паденіе напряженія отъ точки d до точки e и отъ точки d до точки f равно $\frac{i}{2} r_1 = \frac{i}{2} r_1'$ и поэтому въ точкахъ e и f будетъ одинъ и тотъ же потенциалъ, вслѣдствіе чего токъ между e и f появиться не можетъ.

На станціи, принимающей, токъ изъ линіи, развѣтвившись, проходитъ частью черезъ сопротивление r_2 , частью по обмоткѣ электромагнитовъ a_2 и сопротивленію r_4 и далѣе въ землю и вызываетъ дѣйствіе приемнаго аппарата.

При одновременномъ телеграфированіи обѣихъ станцій, т. е. когда оба ключа b_1 b_2 нажаты, въ линіи ll тока не будетъ, такъ какъ обѣ батареи c_1 и c_2 равны по напряженію и дѣйствуютъ взаимнопротивоположно. Въ мѣстныхъ же цѣпяхъ $c_1 - r_1' - r_3 - \text{земля} - c_1$ и $c_2 - r_2' - r_4 - \text{земля} - c_2$ будутъ циркулировать токи, вызывая паденіе напряженія отъ d до f и отъ d' до f' , равное $i r_1'$ и $i r_2'$. Вслѣдствіе этого въ точкахъ f и f' появится потенциалъ меньшій, нежели въ точкахъ e и e' . Разность потенциаловъ между точками $e - f$ и $e' - f'$ обусловитъ появленіе тока въ обмоткахъ электромагнитовъ a_1 и a_2 и пріемные приборы обѣихъ станцій придутъ въ дѣйствіе.

Телеграфированіе безъ проводовъ.

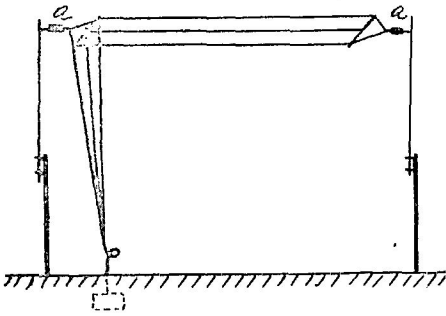
Телеграфированіе безъ проводовъ производится помощью электромагнитныхъ волнъ, которыя возбуждаются воздушною сѣтью передающей станціи и распространяются вдоль поверхности земли концентрическими кругами по отношенію къ излучающей сѣти, со скоростью свѣта, т. е. $3 \cdot 10^8$ метра въ секунду. Въ воздушной сѣти пріемной станціи, попадающей въ сферу дѣйствія проходящихъ электромагнитныхъ волнъ, индуктируются токи, которые обнаруживаются особыми чувствительными приборами.

На каждой станціи нормально устранивается одна воздушная сѣть, называемая излучающей сѣтью или антенной, которая служитъ какъ для передачи телеграммъ, такъ и для ихъ пріема. Въ простѣйшемъ случаѣ антенна состоитъ изъ одиночнаго провода, подвѣшеннаго къ мачтѣ на изоляторахъ, нижній конецъ котораго надежно соединенъ съ землей. Емкость одиночнаго провода не велика, а въ виду этого не велика сила тока въ проводѣ, а, слѣдовательно, и дальность передачи. Для увеличенія емкости антенны, ее составляютъ изъ нѣсколькихъ, удаленныхъ другъ отъ друга проводовъ.

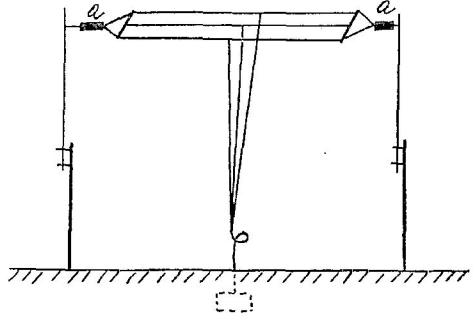
Антенны большихъ станцій имѣютъ сложную форму. На черт. 117 показана Г—образная форма антенны, на черт. 118—Т—образная форма. На упомянутыхъ чертежахъ буквами aa обозначены изоляторы высокаго напряженія.

Для образованія электромагнитныхъ волнъ вокругъ антенны, необходимо возбудить колебанія электрической энергіи въ самой антеннѣ. Если составить цѣпь изъ искроваго промежутка a (черт. 119), изъ конденсатора съ емкостью C и самоиндукціи L , при чемъ цѣпь обладаетъ омическимъ сопротивленіемъ R , и приклю-

чить искровой промежутокъ къ источнику переменнаго тока высокаго напряженія, на примѣръ вторичной обмоткѣ трансформатора, то, при достиженіи напряженія между электродами искрового промежутка величины, достаточной для преодоленія сопротивленія

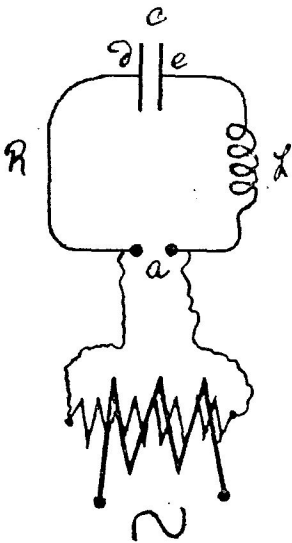


Черт. 117.



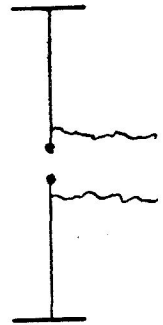
Черт. 118.

воздуха упомянутого промежутка, въ промежуткѣ проскочить искра и накопившаяся въ цѣпи энергія начнетъ разряжаться черезъ искровой промежутокъ. Если при этомъ величины C , L и R удовлетворяютъ неравенству $R^2 C < 4L$, то какъ показываетъ



Черт. 119.

изслѣдованіе уравненія электрической энергіи въ рассматриваемой цѣпи, разрядъ будетъ колебательный, т. е. зарядъ, сосредоточенный, на пластинѣ d конденсатора, перейдетъ на пластину e затѣмъ обратно на пластину d и т. д., причѣмъ величина заряда будетъ съ каждымъ колебаніемъ уменьшаться, вслѣдствіе расхода энергіи въ воздушномъ промежуткѣ на нагреваніе воздуха и другихъ потерь. Если пластины конденсатора начать удалять другъ отъ друга до полного выпрямленія цѣпи въ прямой проводъ (черт. 120), то условія колебанія сохранятся тѣ же и лишь уменьшится емкость цѣпи.

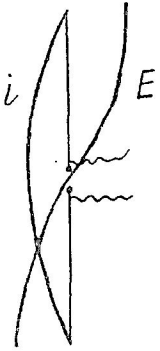


Черт. 120.

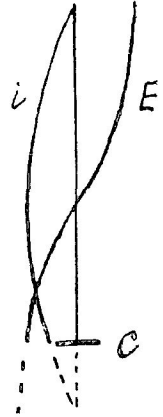
Въ цѣпи, состоящей только изъ провода, зарядъ при каждомъ періодѣ колебанія, дойдя до конца провода, отражается отъ конца провода и направляется къ другому концу провода, отражается отъ послѣдняго и т. д. Такимъ образомъ, на концахъ провода

будетъ появляться періодически накопленіе заряда, а, слѣдовательно, появляться наибольшее напряженіе. Въ серединѣ же провода напряженіе остается равнымъ нулю. Наоборотъ, токъ будетъ достигать періодически наибольшей своей величины въ серединѣ провода, а по концамъ его оставаться равнымъ нулю.

Если по длинѣ провода перпендикулярно къ нему отложить значенія наибольшихъ величинъ напряженія и тока, появляющіяся за періодъ колебанія энергіи, то кривая распределенія тока и напряженія вдоль провода будутъ имѣть видъ, согласно черт. 121. Присоединеніе конденсатора c къ концу провода (черт. 122) измѣняетъ распределеніе тока и напряженія вдоль провода, такъ какъ въ мѣстѣ присоединенія провода къ конденсатору извѣстная величина тока проходитъ въ конденсаторъ и обратно. Поэтому проводъ какъ бы искусственно удлинняется и кривыя тока

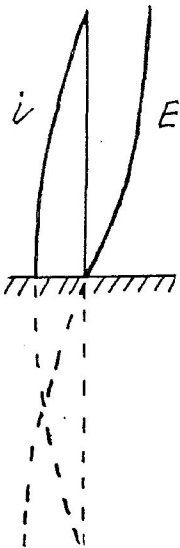


Черт. 121.



Черт. 122.

i и напряженія E принимаютъ видъ, показанный на черт. 122. При присоединеніи провода къ очень большой емкости, какъ на примѣръ къ землѣ, длина провода какъ бы удваивается (черт. 123) и у земли токъ достигаетъ наибольшаго своего значенія, тогда какъ напряженіе въ этомъ мѣстѣ равно нулю. Указанное обстоятельство даетъ возможность при устройствѣ заземленныхъ антеннъ изолировать только верхнюю часть антенны.



Черт. 123.

Каждый періодъ колебанія энергіи въ проводѣ (измѣненіе тока напряженія до $+i_{\max}$ и $+E_{\max}$ и затѣмъ до $-i_{\max}$ и $-E_{\max}$) сопровождается излученіемъ части этой энергіи въ пространство, окружающее проводъ, въ видѣ электромагнитной волны, которая удаляется во всѣ стороны отъ провода со скоростью, какъ выше было указано, приблизительно въ 300.000 км. въ сек.

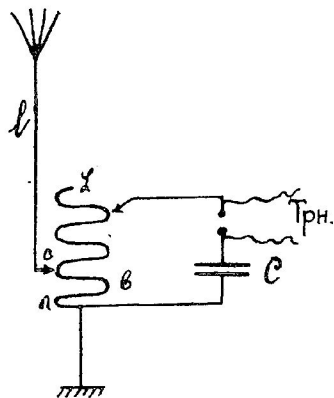
Число періодовъ n колебанія энергіи опредѣляется, какъ показываетъ изслѣдованіе уравненія энергіи конденсаторной цѣпи, согласно вы-

раженія $n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$, гдѣ L и C самоиндукція и емкость провода или вообще воздушной сѣти. Такъ какъ сѣть излу-

часть въ секунду n электромагнитныхъ волнъ, а волны движутся со скоростью $v = 3 \cdot 10^8$ мет. въ сек., то длина волны λ определяется въ $\frac{v}{n}$ или

$$\lambda = 2\pi v \sqrt{LC}.$$

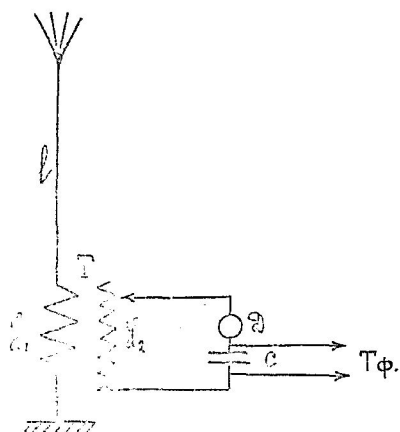
Въ настоящее время для телеграфированія примѣняются волны длиной въ 600—2.000 метровъ и болѣе. Возбужденіе колебаній въ излучающей сѣти (антеннѣ) помощью включенія искрового промежутка непосредственно въ сѣть сопровождается большими потерями энергіи въ названномъ промежуткѣ и, благодаря большому сопротивленію этого промежутка, амплитуда колебаній быстро уменьшается, т. е. колебанія быстро затухаютъ. Для избѣжанія этого Браунъ предложилъ схему включенія искрового промежутка въ вспомогательную цѣпь, связываемую индуктивно съ воздушною цѣпью (черт. 124). Электрическія колебанія въ вспомогательномъ контурѣ съ емкостью C и самоиндукціей L , возбуждаемыя при проскакиваніи искры въ искровомъ промежуткѣ, возбуждаютъ колебанія въ излучающей сѣти l при помощи витковъ abc самоиндукціи L , являющихся общими для контура и для сѣти и какъ бы совмѣщенными витками первичной и вторичной обмотки трансформатора. Для перехода изъ контура въ антенну наибольшаго количества энергіи необходимо, чтобы контуръ и антенна были настроены въ резонансъ, т. е. обладали однимъ и тѣмъ же періодомъ колебаній. Это достигается соответствующимъ подборомъ самоиндукцій и емкостей. Недостаткомъ этой системы является возвратъ значительной части энергіи, переданной вспомогательнымъ контуромъ воздушной сѣти, обратно изъ сѣти въ контуръ, благодаря тому, что въ искровомъ промежуткѣ послѣ исчезновенія искры воздухъ остается іонизированнымъ и вслѣдствіе этого сопротивление воздушнаго промежутка весьма малымъ, т. е. вспомогательная цѣпь остается какъ бы замкнутой на короткую и токи въ антеннѣ индуктируютъ токи въ цѣпи.



Черт. 124.

Для обезпеченія возможно полнаго излученія сѣтью въ пространство энергіи, полученной изъ вспомогательной цѣпи, въ новѣйшихъ радіотелеграфныхъ станціяхъ примѣняются искровые

разрядники, въ которыхъ сопротивленіе воздушныхъ промежутковъ восстанавливается почти немедленно послѣ исчезновенія искры. Эти разрядники состояются изъ мѣдныхъ, изолированныхъ другъ отъ друга дисковъ съ промежутками между ними въ 0,15—0,2 мм. Для той же цѣли примѣняются разрядники съ вращающимися электродами. При этомъ трансформаторъ, къ вторичнымъ борнамъ котораго приключается разрядникъ, питается генераторомъ переменнаго тока съ числомъ періодовъ въ секунду отъ 300 до 500. При каждомъ повышеніи напряженія до максимума, что имѣетъ мѣсто два раза въ періодъ, въ разрядникѣ проскакиваетъ искра, которая съ пониженіемъ напряженія, т. е. почти мгновенно,



Черт. 125.

тухнетъ. Въ періодъ существованія искры энергія вспомогательной цѣпи передается въ воздушную цѣпь и обратно вернуться не можетъ, такъ какъ цѣпь въ слѣдующее мгновеніе электрически уже разомкнута. Энергія, переданная въ воздушную сѣть, начинаетъ колебаться съ такимъ числомъ періодовъ, которое присуще этой сѣти въ зависимости отъ ея самоиндукціи и емкости. Колебанія энергіи, благодаря, главнымъ образомъ, ея излученію, затухаютъ и прекращаются до появленія слѣдующей искры.

Такимъ образомъ, каждой искрѣ отвѣчаетъ посылка сѣтью пачки слабо затухающихъ электромагнитныхъ волнъ.

Электромагнитныя волны, достигнувъ воздушной сѣти принимающей станціи, индуктируютъ въ этой сѣти, при условіи настройки ея въ резонансъ съ сѣтью передающей станціи, электрическія колебанія, которыя затѣмъ обнаруживаются особо чувствительными приборами, называемыми детекторами. Детекторъ включается въ особую вспомогательную цѣпь (черт. 125), связанную индуктивно (помощью воздушнаго трансформатора T) въ воздушную сѣть L . C — блокировочный конденсаторъ, $Tф$ — телефонъ, помощью котораго воспринимается передаваемая телеграмма. Въ системахъ, работающих слабо затухающими волнами, примѣняются детекторы вентильнаго дѣйствія, т. е. пропускающіе токъ только одного направленія. Благодаря этому свойству детектора, переменное напряженіе, возникающее подъ дѣйствіемъ колебаній въ антеннѣ, на концахъ катушки L_2 (вторичная обмотка транс-

форматора T) приводитъ къ появленію въ цѣпи пульсирующаго тока, проходящаго по обмоткамъ телефона, включеннаго параллельно блокировочному конденсатору.

Телеграфный ключъ для подачи телеграммъ включенъ въ первичную цѣпь трансформатора. Въ то время, когда ключъ нажатъ, антенна излучаетъ пачки электромагнитныхъ волнъ. Каждая пачка на приѣмной станціи вызываетъ, вслѣдствіе быстроты колебаній въ пачкѣ, только одно притяженіе мембраны телефона. Такъ какъ число пачекъ отвѣчаетъ числу искръ и равно удвоенному числу періодовъ генератора, а число періодовъ можетъ быть установлено въ предѣлахъ отъ 300 до 500, то мембрана телефона приѣмной станціи будетъ колебаться такое число разъ въ секунду, которое отвѣчаетъ музыкальному тону. Протяжный тонъ отвѣчаетъ тире, короткій точкѣ. Въ современныхъ станціяхъ приѣмъ телеграммъ производится почти исключительно на слухъ.

Телефонія.

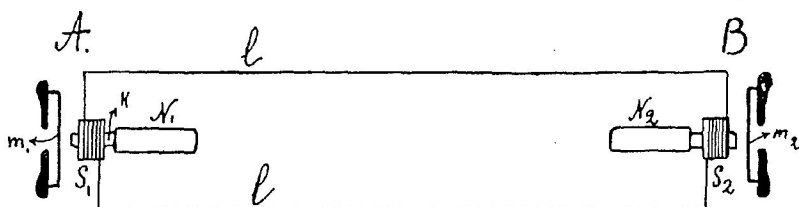
Рѣчь состоитъ изъ звуковъ. Звукъ представляетъ собою колебательное движеніе воздуха. Эти колебанія, дойдя до барабанной перепонки, приводятъ ее также въ колебательное движеніе, вслѣдствіе чего раздражается слуховой нервъ, вызывающій въ мозгу впечатлѣніе звука. Гельмгольцъ указалъ на то, что ухо разлагаетъ принятыя колебательныя движенія на простыя гармоническія (синусоидальныя) колебанія. Такимъ образомъ, синусоидальная волна представляетъ собой составную часть каждаго звука. Въ звукъ необходимо различать три качества: 1) высоту звука, зависящую исключительно отъ частоты колебаній, 2) силу звука, зависящую отъ амплитуды колебаній и 3) тембръ, зависящій отъ характера и формы колебаній.

Телефонъ.

Для передачи рѣчи необходимо сохранить характеръ колебаній. Телефонъ осуществляетъ эту задачу электрическимъ путемъ. Мембрана передающаго аппарата приходитъ въ колебаніе соотвѣтственно звукамъ передаваемой рѣчи. Колебанія мембраны превращаются нижеуказанными способами въ импульсы тока такой силы, частоты и послѣдовательности, которые отвѣчаютъ синусоидальнымъ колебаніямъ передаваемыхъ звуковъ. Импульсы тока передаются по проводамъ въ пріемный аппаратъ, мембрана котораго при посредствѣ электромагнита, возбуждаемаго упомянутыми импульсами тока, приходитъ въ колебательное движеніе, аналогичное движенію передающей мембраны, и воспроизводитъ, дѣйствуя на прилегающій къ ней воздухъ, передаваемую рѣчь.

Изобрѣтателемъ телефона является Белль. Телефонъ въ простѣйшемъ своемъ видѣ показанъ на черт. 126. Аппараты переговоровъ состоятъ изъ станцій *A* и *B* каждый изъ постояннаго

магнита N съ помѣщеннымъ на его концѣ кускомъ мягкаго жѣла k , который служитъ сердечникомъ для катушки s . Обмотка этой катушки включена въ линейную цѣпь ll . Передъ катушкой s находится мембрана m . При передачѣ рѣчи мембрана m подѣйствию звуковыхъ волнъ приходитъ въ колебаніе. Приближеніе мембраны къ сердечнику k , уменьшая магнитное сопротивленіе цѣпи магнитнаго потока, исходящаго изъ постоянного магнита N , усиливаетъ этотъ потокъ. Удаленіе же мембраны отъ сердечника k , наоборотъ, вызываетъ ослабленіе магнитнаго потока. Измѣненіе силы магнитнаго потока возбуждаетъ въ обмоткѣ катушки s электродвижущую силу, при чемъ при усиленіи магнит-



Черт. 126.

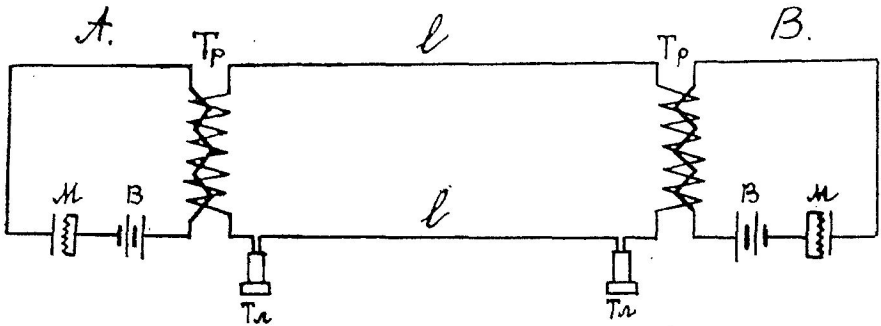
наго потока электродвижущая сила возбуждается одного направленія, а при ослабленіи магнитнаго потока—противоположнаго направленія. Величина электродвижущей силы зависитъ отъ величины измѣненія магнитнаго потока, а форма кривой ея измѣненія отъ быстроты измѣненія силы магнитнаго потока. Вслѣдствіе появленія въ линейной цѣпи, состоящей изъ линейныхъ проводовъ ll и обмотокъ катушекъ s_1, s_2 обоихъ аппаратовъ, электродвижущей силы, переменнѣй по направленію, величинѣ и формѣ, въ названной цѣпи появляется переменный токъ, слѣдующій за измѣненіями электродвижущей силы. Этотъ токъ, вызывая черезъ посредство катушки s_2 принимающаго аппарата усиленіе и ослабленіе магнита N_2 , заставляетъ мембрану m_2 колебаться подобно мембранѣ m_1 и воспроизводить передаваемую рѣчь.

Микрофонъ.

Дальность передачи при описанномъ устройствѣ, однако, очень незначительна, такъ какъ сопротивленіе R линейныхъ проводовъ значительно и возрастаетъ съ удлиненіемъ линіи передачи, а индуцируемая электродвижущая сила E , вслѣдствіе незначи-

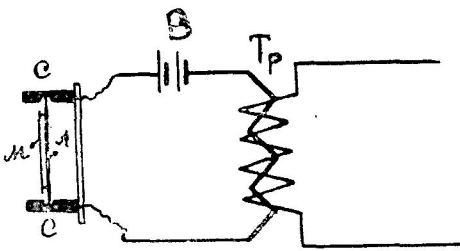
тельности измѣненія магнитнаго потока, очень мала, Такимъ образомъ, и токъ въ линейной цѣпи $I = \frac{E}{R}$ также малъ и при увеличеніи длины линіи l можетъ оказаться недостаточнымъ для приведенія въ надлежащее колебаніе мембраны.

Для возможности телефонированія на большія разстоянія примѣняется для передачи разговора вспомогательная цѣпь, снаб-



Черт. 127.

женная самостоятельнымъ источникомъ электродвижущей силы, а именно, батареей B (черт. 127). Въ эту цѣпь включается послѣдовательно съ батареей первичная обмотка повышающаго трансформатора и приборъ M , называемый микрофономъ. Микрофонъ представляетъ собой контактъ съ переменнымъ сопротивленіемъ. Онъ изготовляется изъ угольныхъ палочекъ или изъ угольнаго

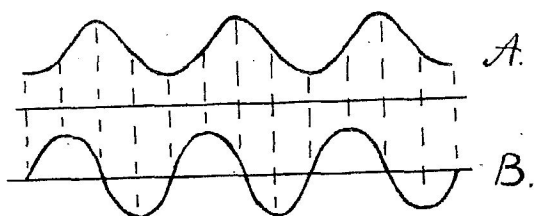


Черт. 128.

порошка и находится подъ дѣйствіемъ мембраны, которая при своихъ колебаніяхъ сжимаетъ и разжимаетъ угольные палочки или порошокъ. При сжатіи контакта сопротивленіе его уменьшается, при освобожденіи увеличивается. Въ простѣйшемъ своемъ видѣ микрофонъ изъ угольныхъ палочекъ изображенъ на черт. 128. M —мембрана, прикрѣпленная къ вертикальной угольной палочкѣ A , CC —угольные колодки, между которыми свободно вставлена палочка A .

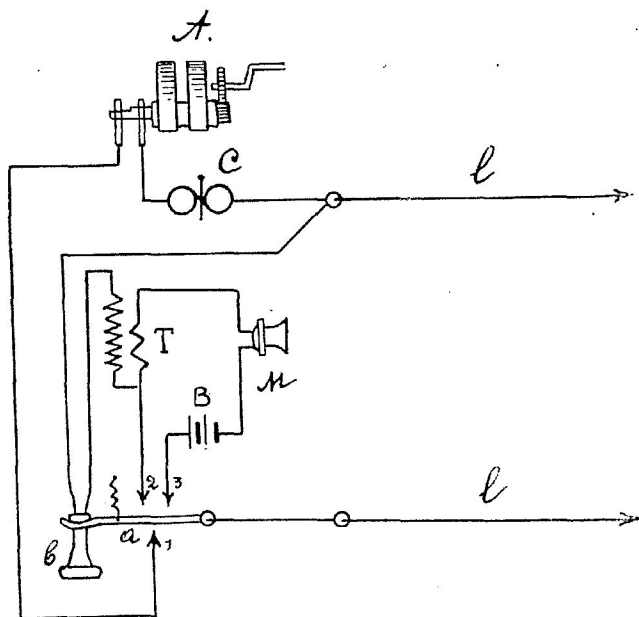
При уменьшеніи сопротивленія контакта токъ въ цѣпи увеличивается и, обратно, при увеличеніи сопротивленія токъ уменьшается. Колебанія мембраны вызываютъ, слѣдовательно, въ цѣпи пульсирующій волнообразный токъ прямого направленія (черт.

129 А). Подъ дѣйствіемъ этого тока магнитный потокъ въ сердечникѣ трансформатора T_p (черт. 128) то усиливается, то ослабляется. Измѣненія же величины магнитнаго потока возбуждаютъ во вторичной обмоткѣ электродвижущую силу переменнаго направленія (129 В). Подбирая соотвѣствующимъ образомъ число витковъ въ первичной и вторичной обмоткахъ трансформатора, можно преобразовать низкое напряженіе батареи B въ высокое напряженіе переменнаго тока, достаточное для преодоленія сопротивленія линейной цѣпи и полученія въ ней такой силы тока, при которой ясность рѣчи въ приемномъ аппаратѣ будетъ обезпечена. Телефоны T_n включаются въ линейную цѣпь (черт. 127).



Черт. 129.

Въ схемахъ, показанныхъ на черт. 127 и 128, микрофо батарея B замкнута на себя черезъ микрофонъ и первичную сб-



Черт. 130.

мотку трансформатора, что сопряжено съ быстрымъ израсходо-
ваніемъ батареи. Для сохраненія батареи поэтому необходимо
микрофонную цѣпь держать нормально въ разомкнутомъ состоя-

ній и замыкать ее при передачѣ разговора. Достигается это при помощи переключателя въ видѣ рычага *a* (черт. 130), на концѣ котораго вѣшается телефонная трубка *b*. При разговорѣ трубка снимается, а рычагъ *a* поднимается подъ вліяніемъ пружины вверхъ и замыкаетъ микрофонную цѣпь.

Для вызова пріемной станціи необходимо включать въ линейную цѣпь звонокъ, а на передающей станціи индукторъ, помощью котораго звонокъ приводится въ дѣйствіе. А такъ какъ каждая станція является и передающей и принимающей, то звонокъ и индукторъ должны быть включены въ линейную цѣпь на каждой станціи. Включение этихъ приборовъ, однако, значительно увеличиваетъ сопротивление линейной цѣпи и ослабляетъ ясность передачи. Устраняется это тѣмъ, что при подъемѣ рычага *a* вверхъ, звонокъ и индукторъ или выключаются изъ цѣпи или шунтируются короткимъ замыканіемъ.

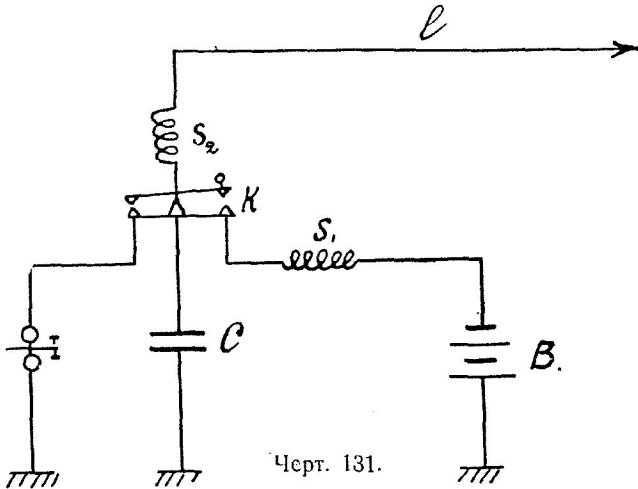
На черт. 130 показана полная схема телефонной станціи. Когда телефонная трубка виситъ на рычагѣ *a*, въ линейную цѣпь *ll* включены индукторъ *A* и звонокъ *C*, черезъ посредство контакта 1 и рычага *a*. При снятіи трубки *b* рычагъ *a*, подымаясь вверхъ, размыкаетъ контактъ 1 и выключаетъ, слѣдовательно, индукторъ и звонокъ. Въ то же время рычагомъ *a* смыкаются контакты 2 и 3 и замыкается микрофонная цѣпь, при чемъ телефонъ *b* и вторичная обмотка трансформатора включаются въ линейную цѣпь *ll* черезъ посредство контакта 2 и рычага *a*.

Одновременное телеграфированіе и телефонированіе по одному проводу.

Использованіе телеграфныхъ проводовъ для одновременнаго по нимъ телефонированія представляется весьма существеннымъ вообще и въ особенности въ желѣзнодорожномъ дѣлѣ, благодаря, съ одной стороны, наличію вдоль желѣзнодорожныхъ линій большаго количества телеграфныхъ проводовъ, съ другой—вслѣдствіе важности телефонныхъ сношеній для регулированія желѣзнодорожнаго движенія.

При этомъ, однако, приходится считаться съ индукціей телеграфнаго провода на телефонный, благодаря которой въ телефонѣ при работѣ телеграфнаго аппарата получается такой сильный трескъ, что разговоръ по телефону становится невозможнымъ. Обусловливается это тѣмъ, что при замыканіи телеграфнаго тока онъ быстро возрастаетъ отъ 0 до нормальнаго значенія. Въ параллельно идущей телефонной цѣпи въ это время индукти-

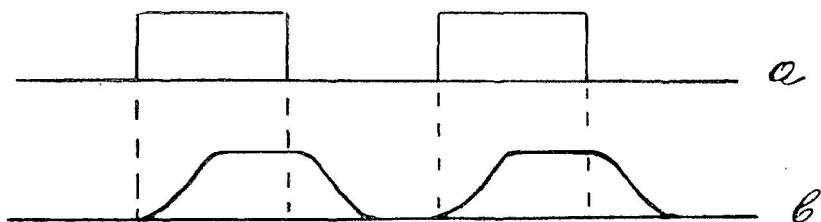
руется электродвижущая сила, пропорциональная коэффициенту взаимоиנדукціи M между обѣими цѣпями и быстротѣ нарастанія телеграфнаго тока, т. е. $\frac{di}{dt}$, гдѣ i сила тока во время его измѣненія. Чѣмъ быстрее нарастаніе тока въ телеграфной цѣпи, тѣмъ больше индуктируемая электродвижущая сила въ телефонной цѣпи и, слѣдовательно, вредный токъ въ той же цѣпи. Мѣры для уменьшенія коэффициента взаимоиנדукціи будутъ указаны ниже. Что касается замедленіе нарастанія телеграфнаго тока, то это достигается, съ одной стороны, включеніемъ въ телеграфную линію послѣдовательно катушекъ самоиндукціи, состоящихъ изъ витковъ изъ изолированной проволоки и желѣзнаго сердечника



Черт. 131.

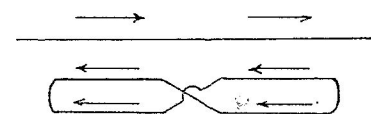
для увеличенія самоиндукціи витковъ, съ другой стороны включеніемъ конденсаторовъ, параллельно телеграфной батарее. Возможно и одновременное примѣненіе обоихъ приспособленій. Схема ихъ включеній показана на черт. 131. При замыканіи телеграфнаго ключа K токъ изъ батареи B устремляется черезъ обмотку индукціонной катушки S_1 . Появленіе въ этой обмоткѣ тока вызываетъ появленіе въ сердечникѣ катушки магнитнаго потока, нарастающаго одновременно съ токомъ. Но съ другой стороны измѣненіе магнитнаго потока индуктируетъ въ обмоткѣ электродвижущую силу, противодействующую нарастанію тока. При размыканіи тока происходитъ обратное явленіе, т. е. индуктируемая въ обмоткѣ, благодаря уменьшенію магнитнаго потока, электродвижущая сила стремится продлить токъ. Такимъ образомъ, измѣненіе тока по времени вмѣсто изображеннаго на черт. 132 *a* принимаетъ видъ, показанный на черт. 132 *b*.

Что касается конденсатора C , то при замыкании ключа K ток из батареи B сначала устремляется на зарядку конденсатора, а затем постепенно нарастает в линии. При размыкании



Черт. 132.

цепи заряд конденсатора устремляется в линию, замедляя его исчезновение. Катушки самоиндукции, применяемые для вышеуказанной цепи, носят название градуаторов, а комбинация этих катушек с конденсатором, согласно черт. 131, предложенная Риссельбергом, названа им анти-индуктором.



Черт. 133.

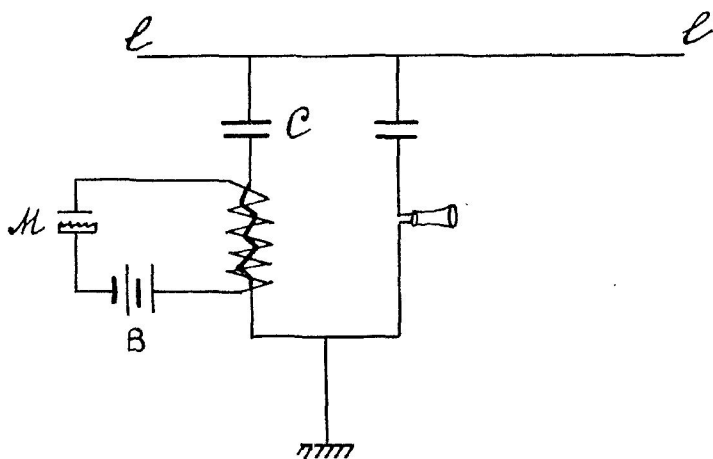
При одновременном телефонировании по телеграфным проводам, телеграфные провода снабжаются градуаторами, конденсаторами или антииндукторами, телефоны же и микрофоны включаются через посредство конденсаторов, как показано на черт. 133. Благодаря этим конденсаторам

телеграфные токи не могут попасть ни в телефонную, ни в микрофонную цепь. Телефонные же переменные токи, благодаря большой их частоте, встречают большое сопротивление в самоиндукции градуаторов и обмоток электромагнитов телеграфных аппаратов и, наоборот, свободно проходят через конденсаторы, вследствие чего обеспечивается телефонная передача.

Телефонные линии.

Для образования линейной цепи, соединяющей между собою телефонные аппараты двух станций, необходимо применение или двух проводов, или одного провода и земли, заменяющей, как и в телеграфных цепях, второй провод. Таким образом, телефонные линии бывают двух типов: однопроводные и двухпроводные. Однопроводные линии имеют преимущество перед двухпроводными в отношении большей дешевизны, благодаря экономии на одном проводе. С другой стороны, однако, одно-

проводныя линіи подвержены въ значительно большей степени постороннимъ вліяніямъ, искажающимъ передаваемую рѣчь и вызываемымъ колебаніями провода въ магнитномъ полѣ земли, разностью потенциаловъ въ точкахъ заземленія провода, индукціей сосѣднихъ проводовъ и проч. Поэтому телефонныя линіи устраиваются преимущественно двухпроводными. На телефонную передачу весьма вредно отражается емкость и самоиндукція проводовъ. Емкость воздушныхъ проводовъ весьма незначительна и при разстояніяхъ передачи до 1.000 км. емкостью проводовъ практически можно пренебрегать. Наоборотъ, самоиндукція воздушныхъ проводовъ значительна и поэтому сильно вліяетъ на дальность телефонной передачи. Ея вліяніе выражается, съ одной



Черт. 134.

стороны, въ уменьшеніи амплитуды передаваемыхъ токовъ, съ другой — въ измѣненіи фазы этихъ токовъ, при чемъ на токи большей частоты это вліяніе больше, нежели на токи болѣе низкихъ частотъ. А такъ какъ токи передаютъ звуки, а ихъ частота отвѣчаетъ высотѣ звука, то въ результатѣ получается неодинаковое искаженіе звуковъ, усиливающее искаженіе рѣчи.

Коэффициентъ самоиндукціи желѣзнаго провода ¹⁾ значительно больше, нежели мѣднаго ²⁾, благодаря большому коэффи-

¹⁾ Коэффициентъ самоиндукціи желѣзнаго провода

$$L = 2l \left(\lg n \frac{2l}{r} - 1 + \frac{\mu}{4} \right)$$

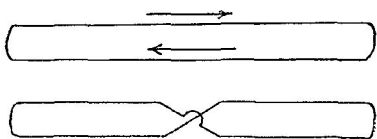
Коэффициентъ самоиндукціи мѣднаго провода

$$L = 2l \left(\lg n \frac{2l}{r} - 0,75 \right).$$

²⁾ l — длина провода, r — его радіусъ, μ — коэффци. магнитн. проницаемости.

цієнту магнитной проникаемости желѣза, обусловливающему появленіе вокругъ проходящаго по проводнику тока въ желѣзномъ проводѣ значительно большее число магнитныхъ линій силъ, чѣмъ въ мѣдномъ. Большая самоиндукція желѣзныхъ проводовъ сокращаетъ дальность телефонной передачи по сравненію съ мѣдными проводами болѣе, чѣмъ въ 3 раза. При мѣдныхъ проводахъ телефонированіе возможно въ предѣлахъ около 1.000 км.

Вліяніе взаимоиндукціи отдѣльныхъ линейныхъ цѣпей имѣетъ существенное значеніе на телефонную передачу. При появленіи или измѣненіи тока въ одной изъ цѣпей въ другой цѣпи, расположенной рядомъ съ первой, индуктируется токъ, который будетъ



Черт. 135.

тѣмъ сильнѣе, чѣмъ больше индуктирующій токъ и чѣмъ ближе расположены обѣ цѣпи. Вліяніе однопроводной цѣпи на однопроводную весьма велико и ощущается даже

при удаленіи цѣпей, идущихъ параллельно на протяженіи 1 км., болѣе, чѣмъ на 300 метровъ другъ отъ друга. Вліяніе однопроводной цѣпи на двупроводную, а также двупроводной на двупроводную значительно меньше и можетъ быть доведено до практически безвредной величины, путемъ устройства перекрещиваній двупроводныхъ линій, какъ то показано для перваго случая на черт. 134 и для втораго случая на черт. 135. И въ томъ и въ другомъ случаѣ электродвижущія силы, индуктируемыя въ каждомъ изъ двухъ перекрещиваемыхъ проводовъ равны по величинѣ и противоположны по знаку и поэтому, компенсируясь, не даютъ возможности появиться въ цѣпи индуктивному току.

О П Е Ч А Т К И.

Стрн.	Строка	Напечатано	Должно быть
85	14 снизу	$E' = - \frac{dN}{dt}$.	$E' = - \frac{dN'}{dt}$.
85	12 "	$\frac{dN'}{dt} = N \omega \cos \alpha 10^{-8}$.	$\frac{dN'}{dt} = - N \omega \cos \alpha 10^{-8}$.
85	10 "	$E' = N \omega n \cos \alpha 10^{-8}$.	$E' = - N \omega n \cos \alpha 10^{-8}$.
86	4 "	большемъ,	большемъ или меньшемъ.
87	12 "	$e_1 i_1$,	$e_1 i_1$ (практически $\cos \varphi = 1$ въ виду незначительности i_2 по сравненію съ i_1),
88	6 "	Такъ	Такъ какъ
89	4 сверху	меньшемъ,	большемъ или меньшемъ,
95	7 "	$e_2 i_2$	$e_2 i_2 \cos \varphi_2$
95	9 "		
95	11 "		
95	12 "		
95	7 "	$e_1 i_1$	$e_1 i_1 \cos \varphi_1$
95	11 "		
95	17 "		
95	17 "		
95	18 "		
95	10 снизу	i_2 ,	i_1 ,
96	1 сверху	экономическими	омическими
106	2 "	тонъ	тоннъ
106	6 "	чертежъ	чертежъ
111	5 "	опредѣляется,	опредѣляются,
121	8 "	i_2	i^2
121	6 снизу	i_2	i^2
124	11 сверху	напряженіе	напряженіи
129	7 снизу	главной цѣни	отвѣтвленіи
138	8 "	e_2 ,	e_1 ,