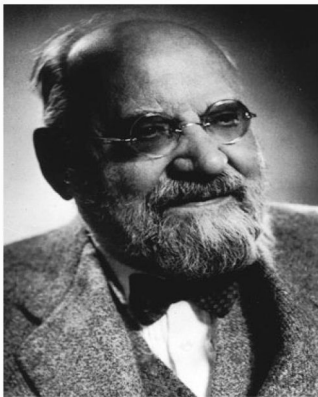


Г. МИ

КУРСЪ
ЭЛЕКТРИЧЕСТВА
И МАГНИТИЗМА

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА





Gustav Adolf Feodor Wilhelm Ludwig Mie

(29 September 1869 – 13 February 1957)

Данная книга найдена и подготовлена по инициативе участников проекта "Заряд" (<http://zaryad.com>)

Особую благодарность за помощь в подготовке данной книги выражаем:

Сорокину Юрию Михайловичу, доктору физ.-мат. наук, профессору, директору фундаментальной библиотеки ННГУ им Н.И.Лобачевского, за разрешение на фотосъемку.

Максиму (Механик), участнику форума проекта, за доблесть, проявленную в поиске и фотосъемки материала.

Апу12, участнику форума проекта, за помощь в подготовке материала.

Вячеславу Васильеву (moderator), автору проекта <http://zaryad.com>, за организацию и руководство армии добровольцев.

Светомиру (cbet0mir), участнику форума проекта, за помощь в редактировании материала.

Часть вторая. Электродинамика.

	Стр.:
Глава I. Общія свойства магнитнаго поля	3 — 24
Признаки магнитнаго поля	3
Носители магнитнаго поля	4
Намагниченіе	5
Полюсы магнита	6
Направленіе магнитнаго поля	9
Изображеніе магнитныхъ полей	10
Магнитное поле земли	13
Существеннос различіе между электрическимъ и магнитнымъ состояніями ээира	22
Глава II. Магнитное состояніе и электрической токъ	25 — 67
Магнитное поле, окружающее электрической токъ	25
Вращательныя движенія въ полѣ тока	27
Примѣры магнитныхъ полей тока	29
Электромагнитъ	31
Безъ магнитнаго поля электрической токъ невозможенъ	34
Измѣрители тока съ подвижнымъ магнитомъ	35
Градуированіе измѣрителей тока	42
Магнитное поле соленоидовъ	44
Сила магнитнаго поля	46
Сложеніе магнитныхъ полей	48
Сила магнитнаго поля земли	50
Первый основной законъ электродинамики Максвелла	52
Механическая модель ээира	62
Глава III. Напряженіе и сила тока	68 — 118
Законъ Ома	68
Легальная единица сопротивленія	70
Соединеніе нѣсколькихъ проводниковъ	72
Реостаты	73
Электрометръ, какъ измѣритель тока	76
Гальванометръ, какъ измѣритель напряженія	77
Измѣрительные инструменты для различныхъ областей измѣреній	78

	Стр.:
Потери напряженія въ проводяхъ	79
Мостъ Витстона	82
Удѣльная проводимость металловъ	84
Измѣненіе проводимости съ температурою	87
Болометръ	89
Теорія проводимости металловъ	90
Проводимость электролитовъ	91
Теорія электрической проводимости	96
Скорость переноса и величина іоновъ	97
Законъ диссоціаціи	99
Измѣненіе проводимости съ температурой	102
Теорія гальваническихъ цѣпей	102
Тепловое дѣйствіе тока	105
Техническія примѣненія теплого дѣйствія тока	107
Тепловые инструменты	110
Теорема Пойнтинга о переносѣ энергіи въ электромагнитномъ полѣ	110
Примѣры переноса энергіи	114
Механическая аналогія переноса мощности въ эфирѣ	116
Глава IV. Силовыя (пондеромоторныя) дѣйствія магнитнаго поля	119—153
Силовое дѣйствіе магнитнаго поля на проводникъ съ токомъ	119
Измѣрители тока съ подвижнымъ проводникомъ	124
Дѣйствіе магнитнаго поля на движущіеся іоны	132
Явленіе Голла	135
Теорія молекулярныхъ магнитовъ	136
Индуктированная электродвижущая сила въ движущихся проводникахъ	138
Законы индукціи въ магнитномъ полѣ	142
Индукція или магнитный силовой потокъ	143
Линіи магнитнаго силового потока	146
Линіи магнитнаго силового потока суть линіи замкнутыя	147
Измѣреніе магнитнаго силового потока	148
Силовой потокъ земного поля	149
Вихревые токи	151
Успокоеніе гальванометра д'Арсонваля	153
Глава V. Возникновеніе и исчезновеніе магнитныхъ полей . 154 — 167	
Законъ относительности индукціонныхъ дѣйствій	154
Электродинамическія поля	156
Возникновеніе и исчезновеніе магнитныхъ полей	158
Второй основной законъ электродинамики Максвелла	160
Законъ индукціи	163
Самоиндукція	164

	Стр.:
Глава VI. Магнитныя свойства тѣлъ	168 — 211
Пустота	168
Проницаемость эѳира	169
Такъ называемыя абсолютныя электромагнитныя единицы	170
Коэффициентъ самоиндукціи	173
Энергія магнитнаго поля	174
Силковыя (пондеромоторныя) дѣйствія поля на магнитныя полюсы	177
Силковыя (пондеромоторныя) дѣйствія магнитнаго поля на проводникъ съ токомъ	178
Измѣренія земнаго поля по методу Гаусса	180
Парамагнитныя и діамагнитныя вещества	181
Измѣренія воспріимчивости	183
Измѣреніе поля по высотѣ поднятія жидкости	185
Теорія парамагнетизма и діамагнетизма	186
Ферромагнитныя вещества	187
Магнитныя цѣпи	190
Катушка съ желѣзнымъ сердечникомъ	193
Методъ замкнутаго кольца (методъ Гопкинсона)	194
Измѣреніе магнитной индукціи силковыми (пондеромоторными) дѣйствіями	195
Гистерезисъ	197
Постоянныя магниты	199
Энергія намагниченія	202
Ферромагнитныя тѣла въ очень сильныхъ магнитныхъ поляхъ	203
Полукольцевой электромагнитъ	205
Другія ферромагнитныя вещества	206
Немагнитное желѣзо	207
Критическая температура ферромагнитныхъ тѣлъ	207
Вліяніе возраста	209
Теорія ферромагнетизма	209
Глава VII. Техническія примѣненія электромагнитныхъ силковыхъ дѣйствій	212 — 255
Сигнальные аппараты	212
Телефонъ	217
Электрическій звонокъ и автоматическій прерыватель	221
Электромоторы для постояннаго тока	223
Магнитное поле мотора	228
Реакція якоря	230
Оборотъ энергіи въ моторѣ	232
Потеря энергіи въ якорномъ желѣзѣ	235
Скорость вращенія мотора	236
Моторъ съ параллельнымъ возбужденіемъ	237

	Стр.:
Моторъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ	239
Генераторы постоянного тока	241
Генераторъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ	244
Генераторъ съ параллельнымъ возбужденіемъ	245
Многополюсныя машины	249
Электрическая передача силы	250
Центральныя станціи постоянного тока	251
Глава VIII. Электромагнитныя колебанія	256 — 412
Переменныя поля	256
Измѣреніе переменныхъ полей	259
Генераторы переменнаго тока	261
Индуктированныя напряженія въ переменномъ магнитномъ полѣ	264
Энергия, переносимая переменнымъ токомъ	269
Дроссельныя (реактивныя) катушки	272
Сравненіе коэффиціентовъ самоиндукціи	273
Безындукціонныя сопротивленія	275
Трансформаторъ переменнаго тока	276
Механическая модель электромагнитной связи въ трансфор- маторѣ	280
Практическія примѣненія трансформаторовъ переменнаго тока	283
Возможны ли трансформаторы постоянного тока	286
Индукціонный аппаратъ	289
Синхронные моторы	295
Асинхронные моторы переменнаго тока	298
Вращающіяся поля	299
Генераторы съ вращающимся полемъ и проводка къ нимъ	302
Моторы вращающаго тока	306
Однофазный моторъ съ вращающимся полемъ	314
Переменный токъ и емкость	318
Сравненіе емкостей	321
Цѣпь переменнаго тока, содержащая емкость и самоиндук- цію	323
Резонансъ	325
Электромагнитныя колебанія при разрядѣ конденсатора	326
Возникновеніе колебаній вслѣдствіе резонанса	331
Опыты съ частыми электромагнитными колебаніями	336
Трансформаторъ Тесла	341
Колебанія при исчезновеніи магнитнаго поля	343
Гудокъ (зуммеръ)	345
Колебанія свѣтовой дуги	346
Возбужденіе электромагнитныхъ колебаній толчками	354
Резонансъ катушекъ	356

	Стр.:
Опыты Лехера	362
Электромагнитныя волны	366
Распространеніе весьма длинныхъ волнъ по проволокамъ	377
Свободныя волны	381
Осцилляторъ Герца	384
Приемники для свободныхъ электрическихъ волнъ	385
Опыты съ волнами Герца	387
Электромагнитная теорія свѣта	393
Телеграфированіе безъ проводовъ	398
Глава IX. Принципъ относительности	413 — 447
Инерція матеріи зависитъ отъ процессовъ, происходящихъ въ эфирѣ	413
Относительность движеній въ механикѣ	420
Относительность движеній въ ученіи объ электричествѣ	423
Опытъ Майкельсона и Морлея	430
Принципъ относительности	439
Измѣненіе массы въ зависимости отъ скорости	444
Верхній предѣлъ скорости	446
Общее значеніе принципа относительности	447

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩІЯ СВОЙСТВА МАГНИТНАГО ПОЛЯ

ПРИЗНАКИ МАГНИТНАГО ПОЛЯ.

223. Помимо электрическаго состоянія, пустота можетъ находиться еще въ иномъ состояніи, называемомъ магнитнымъ. Впервые это состояніе было замѣчено около минерала магнетита, состоящаго изъ химическаго соединенія $Fe_2O_3 \cdot FeO$. Магнетитъ представляетъ собою весьма распространенную желѣзную руду, встрѣчающуюся во многихъ горныхъ породахъ въ видѣ толстыхъ жилъ или отдѣльныхъ включеній. Если вблизи куска магнетита находятся небольшіе кусочки желѣза, напримѣръ, желѣзные опилки или проволочные обрѣзки, то они испытываютъ опредѣленные силовыя дѣйствія, при чемъ направленіе дѣйствующей на нихъ силы по большей части оказывается обращеннымъ къ магнетиту. Эти особыя силовыя дѣйствія, наблюдаемыя только на желѣзѣ и веществахъ, содержащихъ желѣзо, указываютъ на существованіе въ пространствѣ, окружающемъ магнетитъ, особаго состоянія — магнитнаго состоянія. Часть пространства, въ которой это состояніе отчетливо замѣчается, называется магнитнымъ полемъ. Такимъ образомъ, магнетитъ окруженъ магнитнымъ полемъ.

Магнитное поле рѣзко отличается отъ электрическаго поля прежде всего тѣмъ, что обнаруживающіяся въ немъ силовыя дѣйствія распространяются только на вещества, содержащія желѣзо. Но существуетъ кромѣ того цѣлый рядъ иныхъ признаковъ, вполне опредѣленно характеризующихъ магнитное поле. Если внести кусокъ стекла (или иное прозрачное тѣло) въ магнитное поле, то это тѣло пріобрѣтаетъ свойство вращать плоскость поляризаціи свѣта, подобно раствору сахара;



Рис. 138.
Висмутовая спираль для измѣренія магнитнаго поля.

электрическое же поле вызываетъ, какъ мы видѣли выше (§ 2), свойство двойнаго лучепреломленія. Другой особенностью магнитнаго поля является способность вліять на электрическое сопротивление металловъ. Чрезвычайно сильно это вліяніе обнаруживается на висмутѣ, почему весьма часто для констатированія и измѣренія магнитнаго состоянія употребляютъ небольшую спирально свернутую висмутовую проволоку. Такія висмутовые спирали имѣются въ продажѣ (рис. 138). Спираль включаютъ въ цѣпь, состоящую изъ гальванической батареи и измѣрителя тока. Если затѣмъ помѣстить спираль въ сильное магнитное поле, то сопротивление возрастаетъ, и вслѣдствіе этого замѣчается уменьшеніе силы тока, тѣмъ болѣе значительное, чѣмъ сильнѣе магнитное состояніе въ томъ мѣстѣ, гдѣ спираль находится.

Вышеупомянутыя дѣйствія магнитнаго состоянія, а также еще нѣкоторыя, менѣе важныя, могутъ быть использованы для построения магнетоскоповъ и магнетометровъ, т. е. инструментовъ, при помощи которыхъ констатируется и измѣряется магнитное состояніе. Для нашихъ цѣлей наиболѣе удобнымъ магнетоскопомъ является пока подвижная частичка желѣза.

НОСИТЕЛИ МАГНИТНАГО ПОЛЯ.

224. Если изслѣдовать, въ какихъ тѣлахъ можетъ возникать магнитное поле, подобно тому, какъ мы это дѣлали въ § 2 по отношенію къ электрическому полю, то отвѣтъ получается: во всѣхъ. Кромѣ того, магнитное поле можетъ существовать также и въ пустотѣ—магнитное состояніе есть состояніе эѳира.

Легко установить рѣзкое отличіе магнитнаго поля отъ поля электрическаго. Тогда какъ послѣднее въ нѣкоторыхъ тѣлахъ—въ металлахъ и иныхъ проводникахъ—прерывается, магнитное поле пронизываетъ металлы такъ же хорошо, какъ стекло или бумагу, и не существуетъ вообще такихъ тѣлъ, въ которыхъ оно не могло бы существовать продолжительное время. „Магнитныхъ проводниковъ“ не существуетъ.

Точныя изслѣдованія выяснили, что присутствіе молекулъ вообще не оказываетъ замѣтнаго вліянія на магнитное поле. Единственное исключеніе представляютъ собою атомы желѣза, значительно измѣняющіе магнитныя свойства пространства, въ которомъ они находятся. Этимъ объясняются тѣ силовыя дѣйствія, которыя испытыва-

ють тѣла, содержащія желѣзо, подъ вліяніемъ эѳира, находящагося въ магнитномъ состояніи.

НАМАГНИЧЕНІЕ.

225. Тѣло, обладающее особой способностью возбуждать въ окружающемъ его эѳирѣ магнитное состояніе, называется магнитомъ.

Такимъ образомъ, магнетитъ является примѣромъ магнита. О веществѣ, изъ котораго состоитъ магнитъ, говорятъ, что оно намагничено; иногда его называютъ магнитнымъ (что менѣе удобно). Способность вещества вызывать магнитное состояніе называютъ магнетизмомъ или намагниченіемъ.

Желѣзо обладаетъ, по сравненію со всѣми прочими веществами, тѣмъ особеннымъ свойствомъ, что оно, будучи помѣщено въ магнитномъ полѣ, намагничивается, т. е. само становится возбудителемъ новаго магнитнаго поля. Это легко показать, приложивъ желѣзный стержень однимъ концомъ къ куску магнетита. Если при этомъ погрузить другой конецъ стержня въ кучу желѣзныхъ опилокъ, то на немъ повисаетъ цѣлая кисть этихъ опилокъ (рис. 139); это доказываетъ, что около конца стержня образуется магнитное поле. Этотъ фактъ обычно выражаютъ слѣдующей фразой: магнитное поле магнетита индуцируетъ въ желѣзномъ стержнѣ магнетизмъ. Если вывести желѣзный стержень изъ магнитнаго поля, то опилки отъ него отпадаютъ — онъ снова становится немагнитнымъ. Такимъ образомъ, индуцированное въ желѣзѣ намагниченіе является лишь временнымъ и существуетъ лишь до тѣхъ поръ, пока желѣзо находится въ магнитномъ полѣ.

Если вмѣсто желѣзнаго стержня сдѣлать описанный опытъ съ небольшою стальной иглой, то оказывается, что она и послѣ удаленія ея изъ магнитнаго поля сохраняетъ индуцированный магнетизмъ. Магнетизмъ, остающійся въ тѣлахъ на продолжительное время, называютъ постояннымъ. Впрочемъ, если воспользоваться достаточно тонкими методами изслѣдова-



Рис. 139. Индуцированное намагниченіе.

нія, то удастся обнаружить, что и желѣзо при его удаленіи изъ магнитнаго поля не вполнѣ теряетъ индукированный магнитизмъ. Небольшой остатокъ намагниченія обнаруживается и въ желѣзѣ — этотъ остатокъ такъ и называютъ остаточнымъ намагниченіемъ. Способность удерживать индукированный магнитизмъ называютъ коэрцитивной силой. Сталь обладаетъ большой коэрцитивной силой, кованое желѣзо — малой.

Коэрцитивной силой стали пользуются для изготовленія искусственныхъ постоянныхъ магнитовъ, которымъ можно придавать простыя формы, удобныя для изученія законовъ магнитнаго поля. Прямой магнитъ лучше всего получается, если вдоль стального стержня (напримѣръ, вязальной иглы) по всей его длинѣ нѣсколько разъ провести въ одномъ направленіи уже готовымъ магнитомъ; при этомъ намагничиваемаго предмета должно касаться все время одно и то же мѣсто магнита и лучше всего такое мѣсто, около котораго магнитное поле всего сильнѣе.

ПОЛЮСЫ МАГНИТА.

226. Если погрузить приготовленный вышеописаннымъ образомъ прямой магнитъ въ желѣзныя опилки, то оказывается, что на обоихъ его концахъ остаются висѣть кисти опилокъ; къ остальнымъ же частямъ магнита опилки не пристають. Слѣдовательно, только у обоихъ концовъ прямого магнита образуются магнитныя поля, достаточно сильныя для того, чтобы они могли быть обнаружены при помощи нашего примитивнаго метода. Во всякомъ случаѣ, оба эти конца явля-



Рис. 140. Магнитная стрѣлка.

ются центрами, изъ которыхъ исходятъ поля. Чтобы отмѣтить это свойство, ихъ называютъ магнитными полюсами намагниченнаго тѣла.

Мы убѣдились выше (§ 6) въ томъ, что эфиръ, находящійся въ состояніи электрическаго напряженія, оказываетъ силовыя дѣйствія только на электрически заряженныя

тѣла, т. е. на тѣла, являющіяся центрами или узловыми пунктами электрическихъ полей. Аналогичному принципу подчиняются и тѣ силовыя дѣйствія, которыя матеріальныя тѣла испытываютъ со стороны

эѳира, находящагося въ магнитномъ состояніи. Такія дѣйствія испытываютъ только частички желѣза, такъ какъ только на нихъ образуются въ магнитномъ полѣ магнитные полюсы. Чтобы ближе изучить эти силовыя дѣйствія, возьмемъ легко вращающійся прямой постоянный магнитъ — такъ называемую магнитную стрѣлку (рис. 140). Приблизимъ къ ней другой прямой магнитъ, полюсы котораго обозначимъ черезъ I и II. Приближая полюсь I по очереди къ обоимъ полюсамъ магнитной стрѣлки, мы замѣчаемъ, что они относятся къ ней различно. На одинъ полюсь эѳиръ оказываетъ силовое дѣйствіе, стремящееся удалить его изъ поля — полюсь I его „отталкиваетъ“. Другой полюсь подъ вліяніемъ эѳира, находящагося въ состояніи магнитнаго возбужденія, стремится, наоборотъ, продвинуться ближе къ центру поля — полюсь I его „притягиваетъ“. Чтобы удобнѣе было различать полюсы стрѣлки, отмѣтимъ первый красной мѣткой, а второй зеленой. Затѣмъ повторимъ тотъ же опытъ, приближая къ обоимъ полюсамъ магнитной стрѣлки поле полюса II. Въ этомъ случаѣ получаютъ явленія, какъ разъ обратныя: красный полюсь притягивается, зеленый отталкивается.

Оба полюса магнитнаго стержня обладаютъ во всѣхъ отношеніяхъ прямо противоположными свойствами: вызываемыя ими магнитныя поля взаимно противоположны; силы, испытываемыя ими въ одномъ и томъ же магнитномъ полѣ, также имѣютъ взаимно-противоположныя направленія.

Слѣдовательно, оба полюса относятся другъ къ другу, какъ положительныя и отрицательныя числа въ алгебрѣ. Поэтому мы будемъ называть одинъ полюсь магнитнаго стержня положительнымъ, а другой отрицательнымъ.

Для того, чтобы установить разъ навсегда опредѣленные знаки полюсовъ, нужно исходить изъ какого-либо нормальнаго полюса, на примѣръ, полюса I выше употреблявшагося стержня. При помощи его мы испытываемъ всякій иной магнитъ и называемъ отталкиваемый имъ полюсь (съ красной мѣткой) положительнымъ, а притягиваемый (съ зеленой мѣткой) — отрицательнымъ. Если мы стержень съ полюсами I и II также сдѣлаемъ подвижнымъ, подвѣсивъ его за средину, и сравнимъ силовыя дѣйствія, испытываемыя полюсами I и II въ полѣ третьяго къ нимъ приближеннаго магнитнаго стержня, съ тѣми дѣйствіями, которыя въ томъ же полѣ испытываютъ красный и зеленый полюсы, то найдемъ, что полюсь I ведетъ себя такъ же,

какъ красный (положительный) полюсъ, а полюсъ II — какъ зеленый (отрицательный).

Силовыя дѣйствія, испытываемыя магнитными полюсами въ магнитныхъ поляхъ, направлены такъ, что одноименные полюсы всегда отодвигаются ими другъ отъ друга, разноименные же другъ къ другу придвигаются.

Другого рода магнитныхъ полюсовъ, кромѣ положительныхъ и отрицательныхъ, не существуетъ. И въ естественныхъ магнитахъ, на поверхностяхъ которыхъ магнитныя поля обычно распредѣлены весьма неправильно, можно съ точностью различить участки, составленные изъ положительныхъ полюсовъ, и участки, составленные изъ отрицательныхъ полюсовъ.

227. Если изслѣдовать всѣ возможные магниты, специально обращая вниманіе на наличность у нихъ положительныхъ или отрицательныхъ полюсовъ, то выясняется чрезвычайно важный фактъ: не существуетъ магнитовъ, имѣющихъ только положительные или только отрицательные полюсы.

Положительные и отрицательные полюсы ни въ какомъ магнитѣ не встрѣчаются раздѣльно; всякій магнитъ содержитъ въ одинаковой мѣрѣ полюсы обоихъ родовъ.

Это съ особенною отчетливостью можно видѣть на прямомъ магнитѣ; у него всегда на каждомъ концѣ находится по полюсу, на одномъ концѣ — положительный, на другомъ отрицательный. Поля обоихъ полюсовъ равны, что можно заключить уже по одинаковой величинѣ тѣхъ пучковъ желѣзныхъ опилокъ, которые пристають къ обо-



Рис. 141. Разломанный магнитный стержень.

имъ полюсамъ. Можно было бы предположить, что положительный и отрицательный полюсы получатся отдѣльно, если переломить магнитный стержень по серединѣ. Однако, на дѣлѣ получается не то. На обѣихъ поверхностяхъ излома образуются новые полюсы, на одной положительный, на другой отрицательный (рис. 141), такъ что каждая половина стержня представляетъ собою обыкновенный магнитный стержень съ двумя полюсами. Если обѣ половины сложить такъ, чтобы снова получился одинъ цѣлый стержень, то окружающія ихъ

поля налагаются одно на другое и снова получается одинъ магнитный стержень съ полюсомъ на каждомъ концѣ.

228. Если стержень изъ мягкаго желѣза внести въ магнитное поле, то онъ становится магнитомъ. При этомъ въ той его части, которая обращена къ возбуждающему полюсу, индуцируется магнитный полюсъ противоположнаго знака, на удаленной сторонѣ получается, слѣдовательно, полюсъ, одноименный съ возбуждающимъ поле. Въ этомъ легко убѣдиться при помощи небольшой магнитной стрѣлки.

Такъ какъ два разноименные полюса подъ вліяніемъ силового дѣйствія эѳира взаимно притягиваются, то кусокъ желѣза подъ вліяніемъ индуцируемаго въ немъ магнетизма стремится приблизиться къ поднесенному къ нему магниту. Такимъ образомъ мы получаемъ точное объясненіе того факта, на основаніи котораго мы впервые убѣдились въ существованіи магнитнаго состоянія.

НАПРАВЛЕНІЕ МАГНИТНАГО ПОЛЯ.

229. Всѣ описанные выше факты приводятъ насъ къ нижеслѣдующему заключенію:

Магнитное состояніе эѳира можетъ быть вполне охарактеризовано векторіальной величиной.

Это свойство является общимъ у магнитнаго состоянія и у электрическаго состоянія, описаннаго въ I части этой книги. Направленіемъ магнитнаго поля въ нѣкоторомъ мѣстѣ эѳира мы будемъ считать направленіе силы, съ которой дѣйствуетъ въ этомъ мѣстѣ эѳиръ на положительный магнитный полюсъ. Удобнѣе всего опредѣляется направленіе магнитнаго поля при помощи магнитной стрѣлки.

Направленіе, въ которомъ устанавливается магнитная стрѣлка, если, кромѣ силы магнитнаго поля, никакія другія силы на нее не дѣйствуютъ, представляетъ собою направленіе магнитнаго поля; при этомъ положительный полюсъ стрѣлки указываетъ положительное направленіе поля.

Если изслѣдовать поле помощью магнитной стрѣлки, отмѣтить повсюду его направленіе и затѣмъ провести рядъ кривыхъ такимъ образомъ, чтобы каждая изъ нихъ въ любомъ мѣстѣ совпадала съ направленіемъ магнитнаго поля въ этомъ мѣстѣ, то получаютъ магнитныя линіи поля или магнитныя силовыя линіи, представляющія собою прекрасное графическое изображеніе поля. Эти линіи

можно получить тѣмъ же способомъ, что и линіи электрическаго поля (ср. рис. 7, стр. 21 первой части).

Магнитныя силовыя линіи выходятъ изъ положительнаго полюса магнита и втекаютъ въ отрицательный полюсъ. Положительные полюсы являются „источниками“ поля, отрицательные полюсы — „стоками“.

ИЗОБРАЖЕНІЯ МАГНИТНЫХЪ ПОЛЕЙ.

230. Тотъ же пріемъ, помощью котораго мы запечатлѣвали электрическія силовыя линіи (§ 20), мы можемъ примѣнить и къ магнитному полю. вмѣсто рутиловаго порошка мы въ этомъ случаѣ воспользуемся мелкими желѣзными опилками. Подъ вліяніемъ индукціи каждая частичка желѣза превращается въ маленькій магнитъ и устанавливается въ направленіи поля; примыкая другъ къ другу, опилки образуютъ цѣпи, которыя приблизительно имѣютъ видъ силовыхъ линій. Но, конечно, такая картина прямо не даетъ указаній на положительное направленіе этихъ кривыхъ.

Сравнивая полученныя такимъ образомъ изображенія магнитныхъ полей, воспроизведенныя на рисункахъ 142—145, съ изображеніями электрическихъ полей на рис. 8, нельзя не замѣтить, что магнитныя силовыя линіи получаютъ гораздо болѣе отчетливыми, чѣмъ электрическія. Это обстоятельство не является случайнымъ; оно зависитъ отъ того, что не существуетъ никакой магнитной „проводимости“. Полученіе изображеній электрическихъ полей требуетъ бѣльшаго вниманія и удается только при слабыхъ поляхъ, хотя и въ этихъ случаяхъ часто невозможно избѣжать искаженій, происходящихъ отъ переноса электрическихъ зарядовъ благодаря проводимости. Такихъ искаженій въ изображеніяхъ магнитныхъ полей совершенно не бываетъ.

На рис. 142 мы видимъ распредѣленіе силовыхъ линій вокругъ прямого магнита. Онѣ исходятъ изъ части магнита, примыкающей къ положительному полюсу, изгибаются въ сторону отрицательнаго полюса и, наконецъ, снова входятъ въ магнитъ у отрицательнаго полюса. Вблизи обоихъ полюсовъ силовыя линіи расположены особенно густо; какъ разъ въ этихъ мѣстахъ поле особенно сильно (§ 226).

Весьма часто искусственнымъ магнитамъ придаютъ также подковообразную форму. Такая форма обладаетъ тѣмъ преимуществомъ, что поле между обоими полюсами получается почти однородное, при чемъ оно можетъ быть весьма сильнымъ. Рис. 143 от-

носится къ магниту, выпиленному изъ стальной полосы съ прямоугольнымъ сѣченіемъ. На обоихъ его концахъ имѣются еще два при-

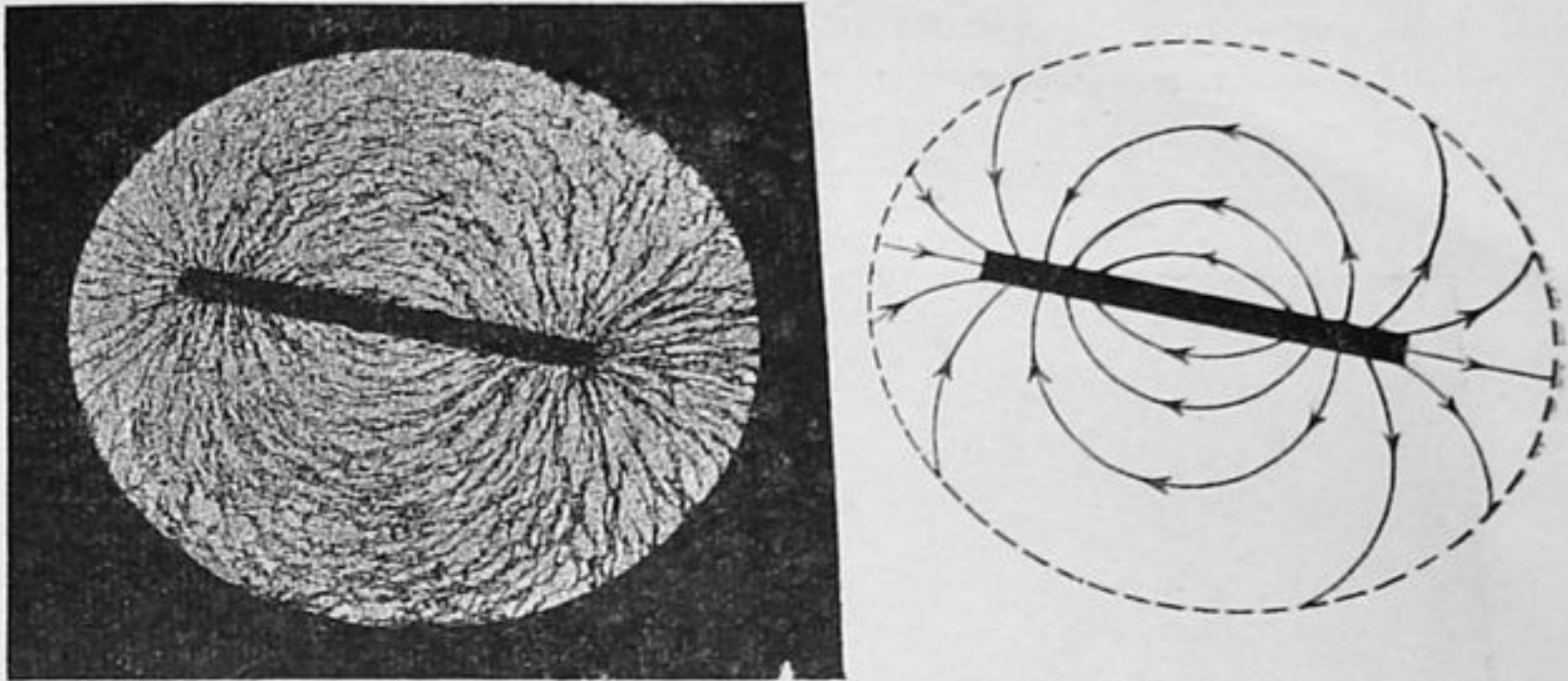


Рис. 142. Поле прямого магнита.

датка, идущіе внутрь — „полюсные башмаки“. Въ узкой щели между этими башмаками поле весьма однородно и вмѣстѣ съ тѣмъ очень

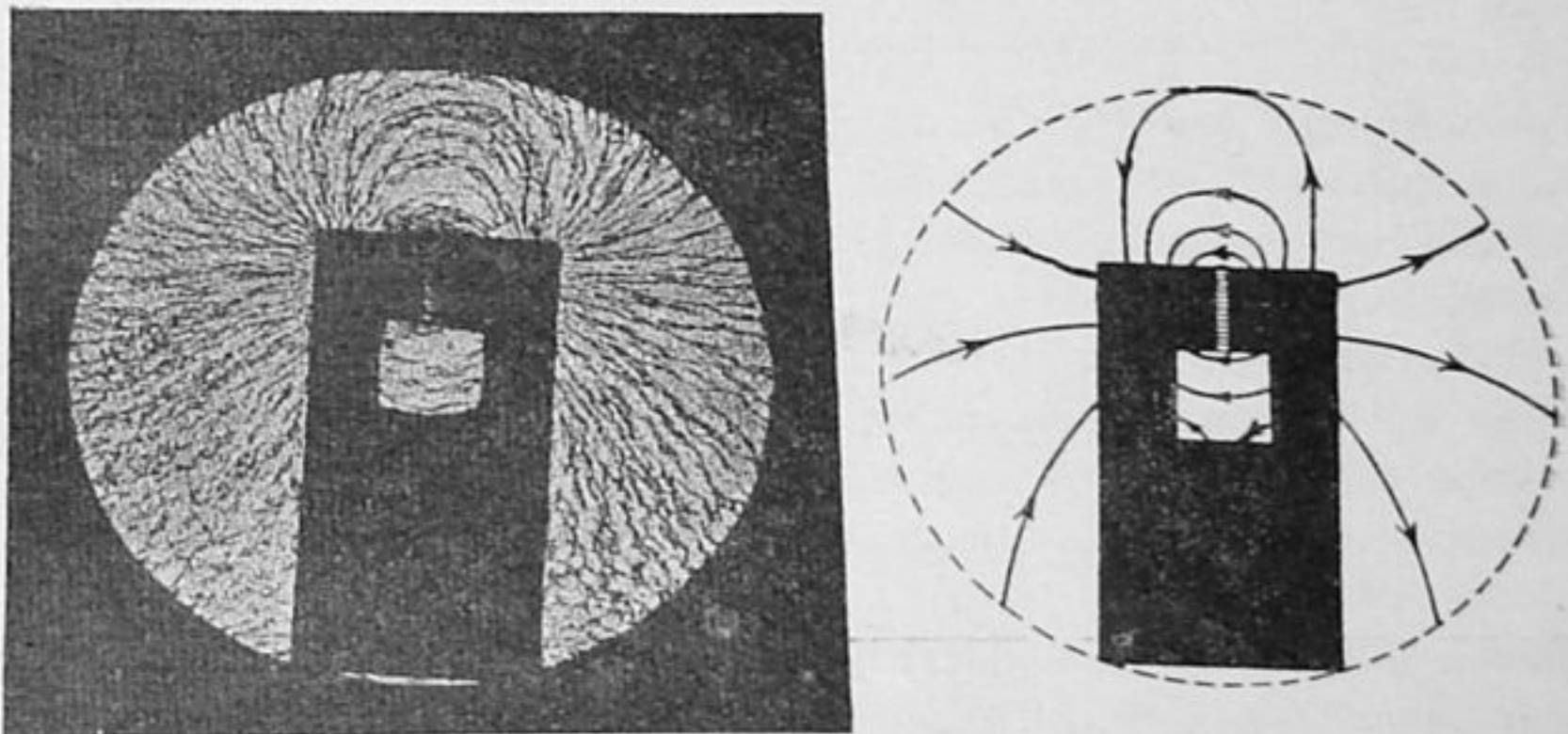


Рис. 143. Поле подковообразнаго магнита съ полюсными башмаками.

сильно, подобно электрическому полю въ плоскомъ конденсаторѣ (рис. 8e и 8f на стр. 27 первой части).

На рис. 144 изображенъ обыкновенный подковообразный магнитъ, представляющій собою изогнутую стальную полосу. Подъ нимъ находится небольшая полоска мягкаго желѣза такой длины, что она какъ разъ можетъ накрыть оба полюса подковообразнаго магнита. Такую пластинку называютъ якоремъ. Изъ распредѣленія силовыхъ линій ясно видно, что якорь въ силу индукціи становится магнитомъ, полюсы котораго противоположны по знакамъ тѣмъ полюсамъ под-

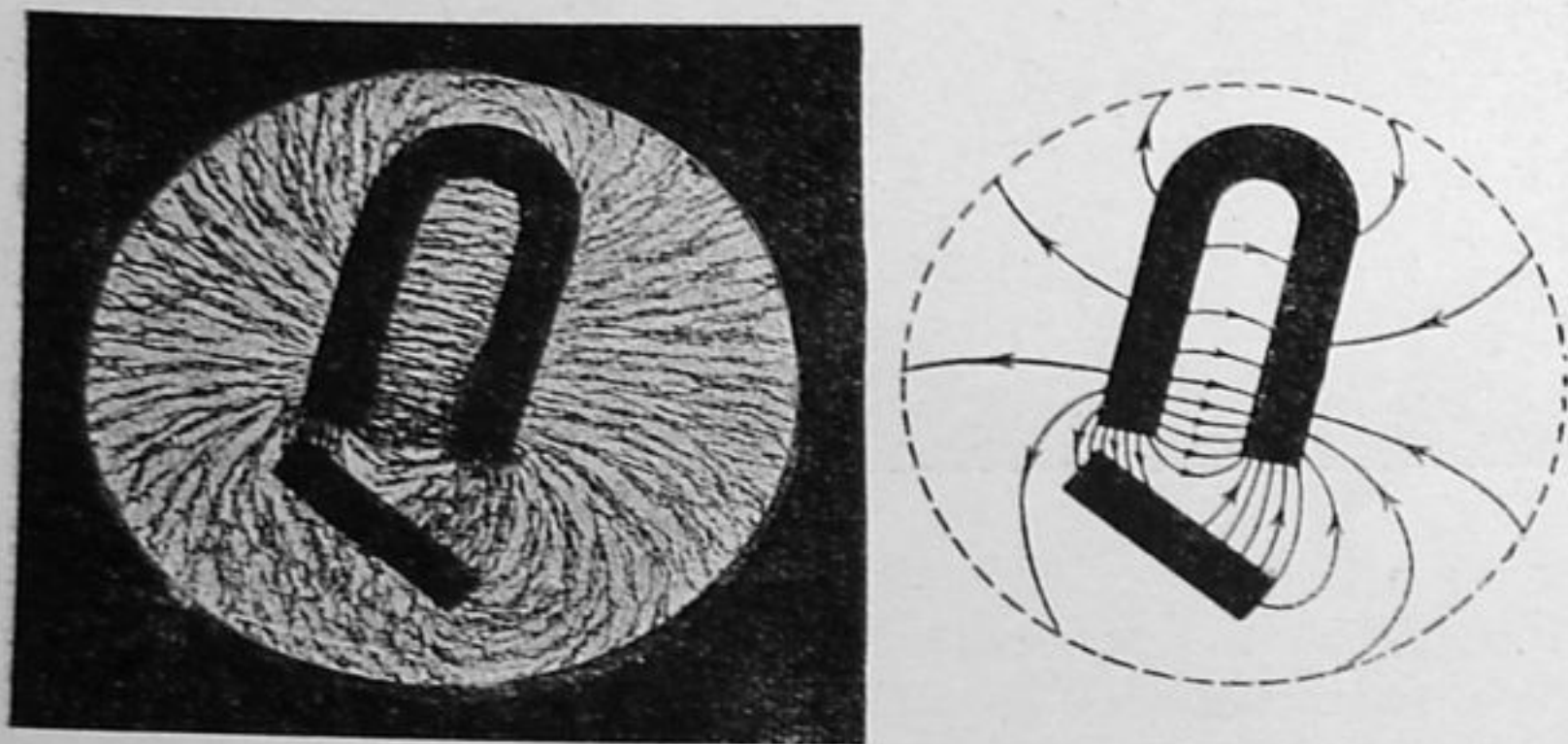


Рис. 144. Подковообразный магнитъ съ якоремъ изъ мягкаго желѣза.

ковообразнаго магнита, къ которымъ они обращены. Слѣдовательно, индукція влѣяетъ на распредѣленіе силовыхъ линій такимъ образомъ, что исходящія изъ подковообразнаго магнита силовыя линіи отчасти втягиваются въ якорь.

Магнитная индукція во многихъ отношеніяхъ аналогична индукціи въ электрическомъ полѣ. Но всегда слѣдуетъ имѣть въ виду большое отличіе, заключающееся въ отсутствіи магнитныхъ проводниковъ; полная аналогія можетъ быть проведена лишь по отношенію къ „свободнымъ“ электрическимъ зарядамъ въ изоляторѣ съ большой діэлектрической постоянной, о которыхъ было сказано въ § 87 (ср. рис. 56 на стр. 139 первой части). Во всякомъ случаѣ, аналогія простирается настолько далеко, что мягкое желѣзо можетъ оказывать магнитныя экранирующія дѣйствія, подобно проводникамъ въ электрическомъ полѣ (ср. рис. 32 на стр. 81 первой части). На рис. 145 видно такое дѣйствіе, производимое полымъ цилиндромъ изъ мягкаго же-

дѣла въ полѣ между двумя магнитными полюсами. Слѣдуетъ отмѣтить, что экранирующее дѣйствіе проводниковъ электричества замѣчается уже у тончайшихъ металлическихъ слоевъ, магнитное же экранирующее дѣйствіе можетъ быть замѣчено только въ томъ случаѣ,

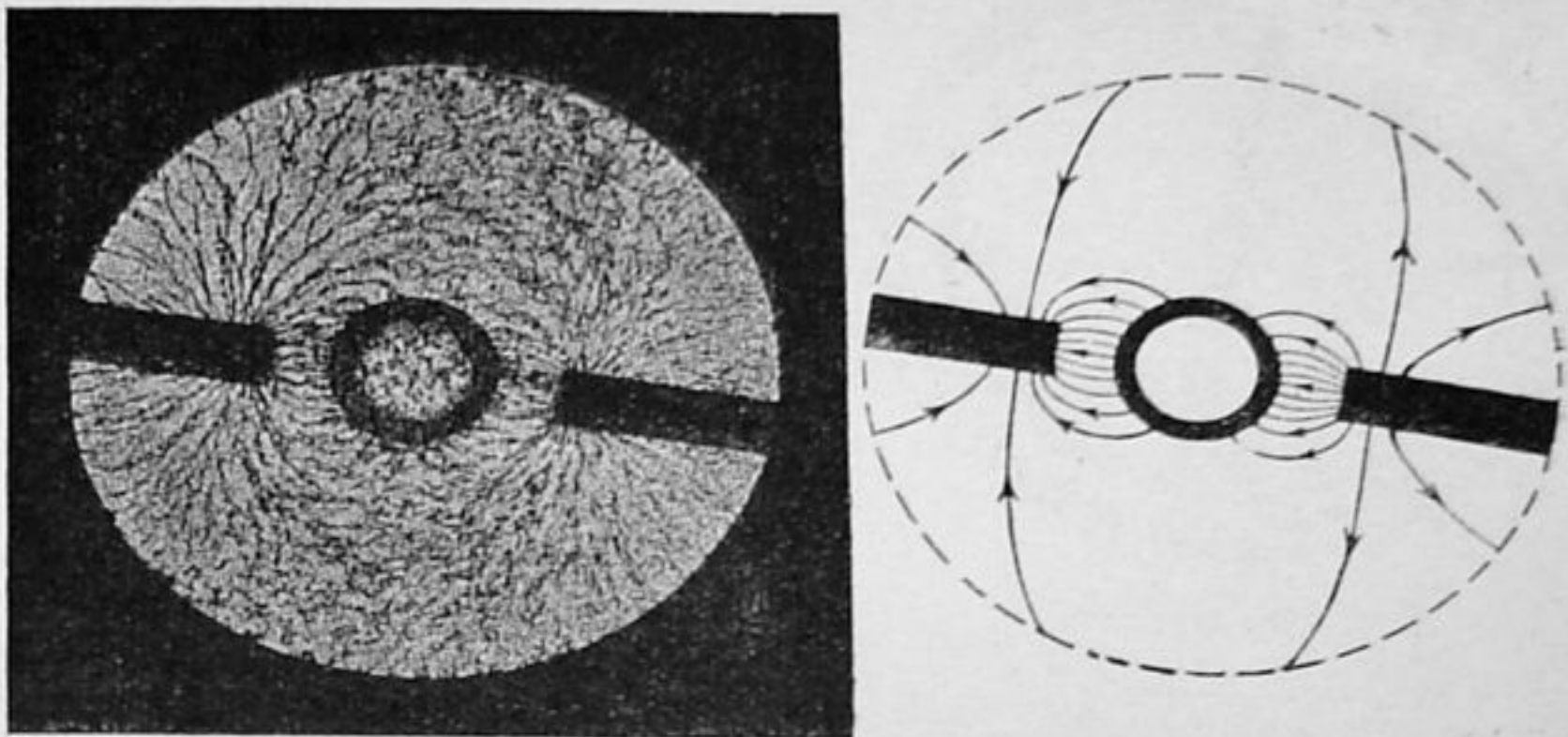


Рис. 145. Магнитное экранирующее дѣйствіе полаго желѣзнаго цилиндра.

когда часть пространства защищена толстыми желѣзными стѣнками; кромѣ того, даже въ лучшемъ случаѣ, пользуясь весьма чувствительными индикаторами, всегда еще можно замѣтить слабое поле внутри экранированного пространства. Это вновь служитъ доказательствомъ того, что желѣзо не представляетъ собою „магнитнаго проводника“, внутри котораго поле уничтожается. Однако, все же и это не совершенное экранирующее дѣйствіе желѣза на магнитное поле играетъ важную роль при построеніи магнитныхъ измѣрительныхъ приборовъ (такъ называемыхъ гальванометровъ); помощью желѣзной оболочки (панцыря) можно почти совершенно устранить вліяніе всѣхъ постороннихъ магнитныхъ полей.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ.

231. Если гдѣ-либо внѣ дѣйствія другихъ магнитовъ укрѣпить на вертикальной оси легкоподвижную магнитную стрѣлку, то оказывается, что она всегда устанавливается по вполне определенному направленію, мало отличающемуся отъ направленія сѣверь-югъ. Какъ извѣстно, такую вращающуюся въ горизонтальной

плоскости магнитной стрѣлкой, снабженною раздѣленнымъ кругомъ, пользуются подъ именемъ компаса или буссоли для опредѣленія направленія сѣверъ-югъ (рис. 146). Если желательно получать при

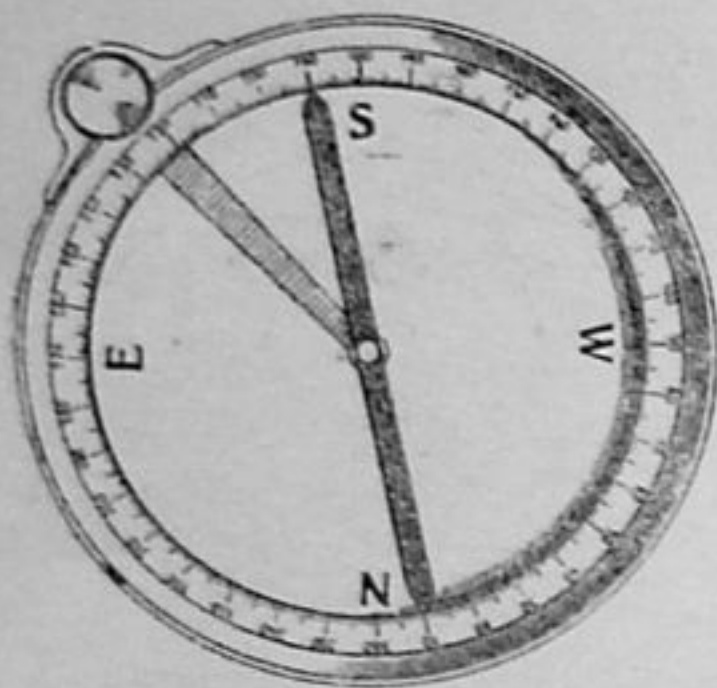


Рис. 146. Буссоль.

помощи компаса точныя указанія, то необходимо знать, насколько отклоняется его стрѣлка отъ направленія сѣверъ-югъ. Уголь, составляемый магнитной стрѣлкой компаса съ географическимъ меридіаномъ, носитъ названіе склоненія. Такъ какъ величины склоненій различны въ разныхъ мѣстахъ земли, то для практическихъ цѣлей пользуются картами, на которыхъ нанесены величины склоненія. Мѣста одинаковаго склоненія соединяются на такихъ картахъ кривыми — такъ называемыми изогонами. Изогоны обычно проводятся для склоненій, выражающихся цѣлымъ числомъ градусовъ (0° , 1° , 2° и т. д.); иногда употребляются и иные интервалы. По такой картѣ можно опредѣлить величину склоненія для любого мѣста земли. На рис. 147 дана такая карта, содержащая изогоны для интерваловъ въ 10° . Въ Германіи склоненіе колеблется между 6° и 13° , при чемъ стрѣлка отклоняется къ сѣверо-западу (или юго-востоку). Направленіе стрѣлки компаса часто называютъ магнитнымъ меридіаномъ даннаго мѣста.

Если подвѣсить магнитную стрѣлку такъ, чтобы она могла вращаться вокругъ горизонтальной оси, проходящей точно черезъ ея центръ тяжести, то стрѣлка опять устанавливается во вполне опредѣленномъ положеніи равновѣсія. Если бы стрѣлка не была намагничена, то, будучи подвѣшена такимъ образомъ, она, конечно, находилась бы въ состояніи безразличнаго равновѣсія. Чтобы убѣдиться въ томъ, что стрѣлка подвѣшена точно въ центрѣ тяжести, перемагнитимъ такую стрѣлку¹⁾, натирая ее сильнымъ магнитомъ; если это условіе выполнено, то стрѣлка устанавливается совершенно такъ

1) Т. е. намагнитимъ ее такъ, чтобы сѣверный конецъ сталъ южнымъ и наоборотъ.

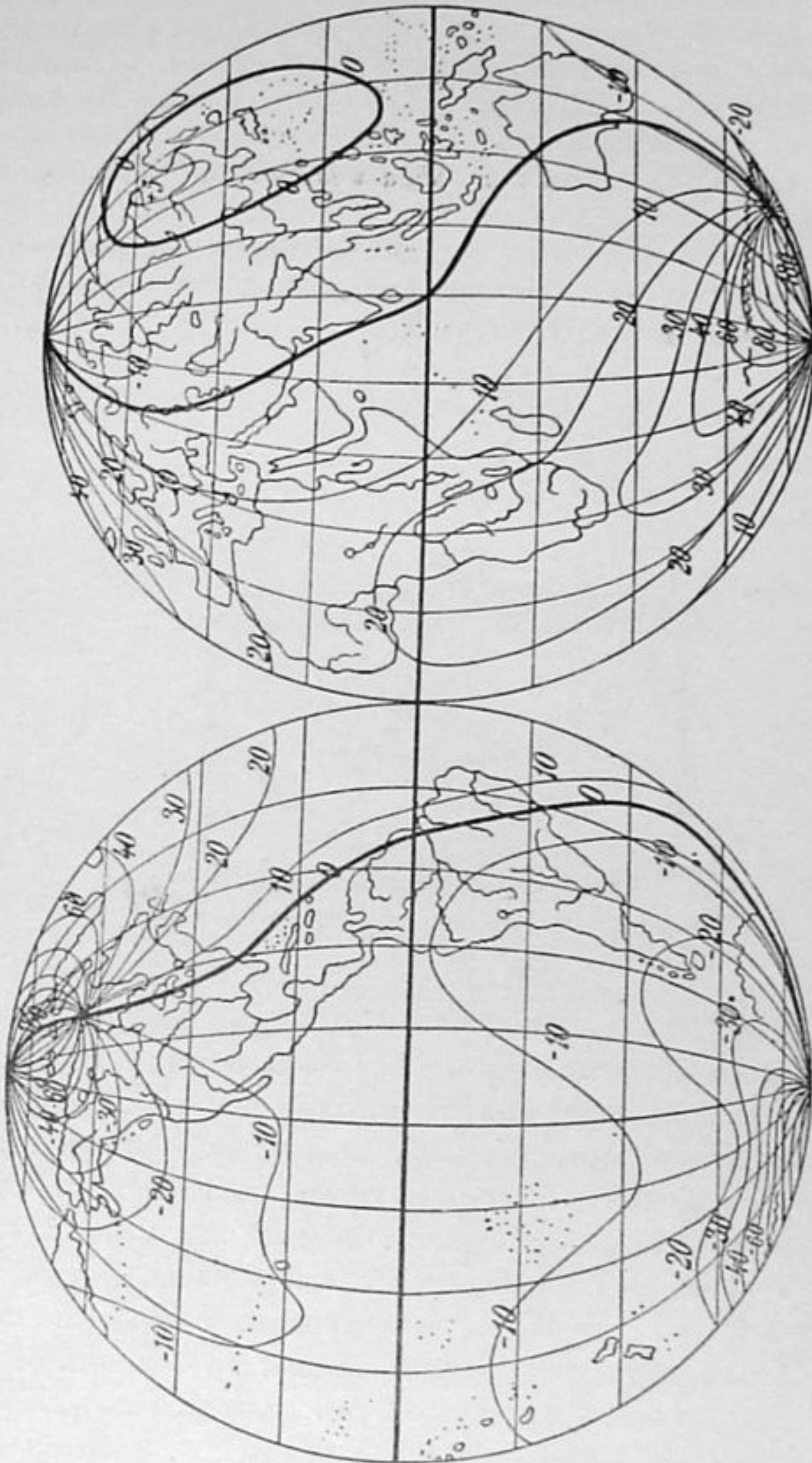


Рис. 147. Карта магнитного склонения (изогоны).

же, какъ и при первомъ намагниченіи; только тотъ конецъ, который прежде былъ обращенъ вверхъ, теперь смотритъ внизъ, и наоборотъ. Если при вторичномъ намагниченіи стрѣлка не составляетъ горизонталью точно такого же угла, какъ и при первомъ намагниченіи, то это показываетъ, что на ея ориентировку оказываетъ вліяніе сила тяжести, и потому положеніе центра тяжести должно быть исправлено (подпиливаніемъ и т. п.). Если послѣ того, какъ центръ тяжести стрѣлки приведенъ въ надлежащее положеніе, установить ее такъ, чтобы плоскость ея вращенія совпадала съ магнитнымъ меридіаномъ, то она укажетъ точно направленіе магнитнаго поля, дѣй-

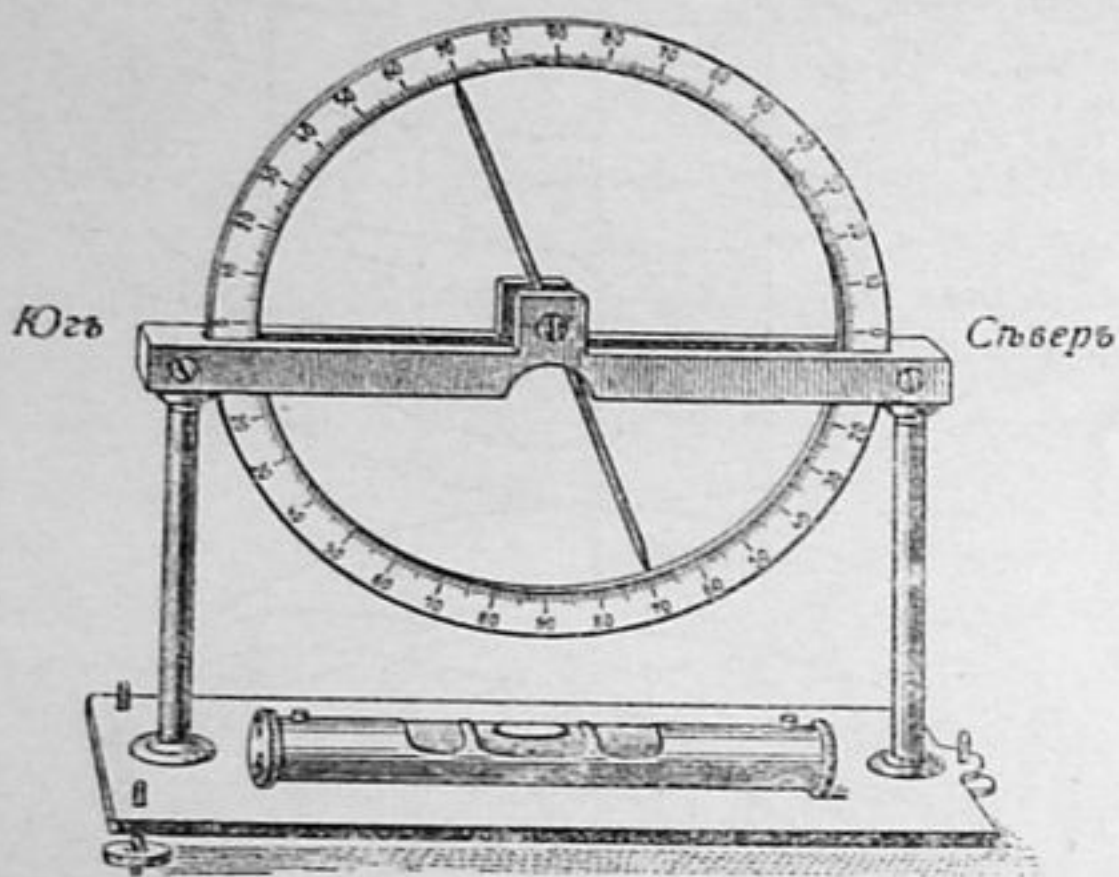


Рис. 148. Стрѣлка наклоненія.

ствующаго на ея полюсы. Такимъ способомъ установленную магнитную стрѣлку называютъ стрѣлкой наклоненія (рис. 148), а уголь, составляемый ею съ горизонтальной плоскостью — угломъ наклоненія или наклоненіемъ. Наклоненіе сильно мѣняется при переходѣ отъ одного мѣста земли къ другому. Вблизи экватора оно мало отличается отъ нуля, но по мѣрѣ приближенія къ полюсамъ, вообще говоря, возрастаетъ. При этомъ въ сѣверномъ полушаріи сѣверный конецъ магнитной стрѣлки обращенъ внизъ; въ южномъ полушаріи, наоборотъ, внизъ обращенъ южный конецъ стрѣлки. Въ Германіи величина наклоненія колеблется отъ 64° до 68° . Кривыя, соединяющія мѣста одинаковаго наклоненія, называются изоклинами.

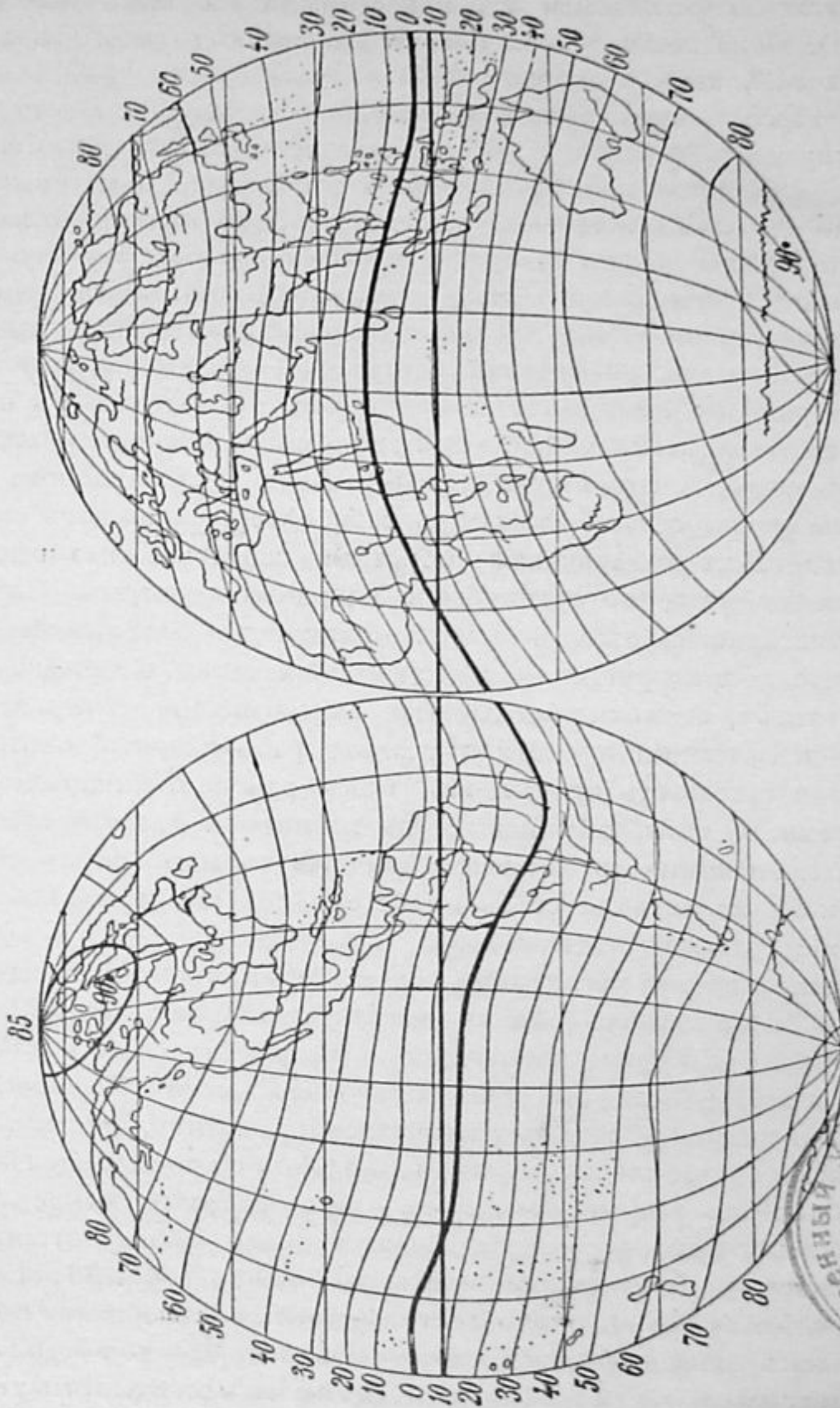


Рис. 149. Карта магнитного наклонения (изоклины).



Существуют карты земли съ нанесенными на нихъ изоклинами (рис. 149). Понятно, что эти кривыя не имѣютъ такого практическаго значенія, какъ изогоны.

Изъ всего вышензложеннаго ясно, что земля постоянно окружена магнитнымъ полемъ, т. е. представляетъ собою магнитъ; направленіе силовыхъ линій у поверхности земли, о которыхъ мы судимъ по стрѣлкѣ наклоненія, показываетъ, что полюсы этого магнита расположены вблизи географическихъ полюсовъ земнаго шара. Существованіе этого земнаго поля можетъ быть иногда замѣчено и въ практической жизни. Если мы будемъ держать стальной стержень въ направленіи поля, указываемомъ стрѣлкой наклоненія, и ударимъ нѣсколько разъ по нему молоткомъ, то онъ превратится въ прямой магнитъ, въ чемъ легко убѣдиться при помощи магнитной стрѣлки. При этомъ тотъ конецъ стержня, который во время ударовъ былъ направленъ внизъ, отталкиваетъ отъ себя сѣверный полюсъ стрѣлки и притягиваетъ къ себѣ южный; обратныя свойства оказываются у того конца стержня, который былъ направленъ вверхъ. Слѣдовательно, намагниченіе, дѣйствительно, принимаетъ направленіе, соответствующее индуктирующему дѣйствию поля земли. Стержень легко „перемагнитить“, если помѣстить его въ магнитное поле земли въ обратномъ направленіи и снова нѣсколько разъ ударить молоткомъ. Большинство стальныхъ предметовъ, подъ вліяніемъ индукціоннаго дѣйствія земнаго поля, обращаются въ магниты, и человѣчество, несомнѣнно, познакомило бы этимъ путемъ съ магнитнымъ состояніемъ, если бы магнитъ не сталъ извѣстенъ раньше, чѣмъ вошли въ употребленіе стальные издѣлія.

Мы воспользуемся магнитнымъ полемъ земли, чтобы разъ навсегда опредѣлить знаки обоихъ родовъ магнитныхъ полюсовъ. Методъ, описанный въ § 226, не давалъ бы возможности легко избѣгать ошибки и потому былъ бы мало пригоденъ, если бы всякій не могъ имѣть всегда въ своемъ распоряженіи магнитъ, полюсы котораго повсюду считались бы за „нормальные полюсы“. Къ счастью, мы всѣ обладаемъ такимъ магнитомъ — имъ является самая земля. Тотъ магнитный полюсъ, который лежитъ около южнаго географическаго полюса, условились принимать за полюсъ I § 226; полюсъ II лежитъ, слѣдовательно, около географическаго сѣвернаго полюса. Мы получаемъ отсюда слѣдующее опредѣленіе: тотъ полюсъ прямого магнита, который въ магнитномъ полѣ земли указы-

васть на сѣверъ, представляетъ собою положительный магнитный полюсъ, а тотъ полюсъ, который указываетъ на югъ, — отрицательный.

Поэтому часто обозначаютъ положительный магнитный полюсъ буквою N , и отрицательный — буквою S . Земной магнитъ имѣетъ положительный полюсъ (N) около географическаго южнаго полюса, а отрицательный полюсъ (S) — вблизи географическаго сѣвернаго полюса.

232. О точномъ опредѣленіи и о способахъ измѣренія силы магнитныхъ полей мы подробно будемъ говорить послѣ того, какъ нами будутъ изложены законѣрныя зависимости, существующія между магнитными и электрическими явленіями. Для измѣренія силы поля земли методы были разработаны еще Гауссомъ (Gauss). Простѣйшій изъ этихъ методовъ заключается въ непосредственномъ сравненіи поля земли съ другимъ постояннымъ извѣстнымъ полемъ. Для магнитнаго состоянія (какъ и для электрическаго) имѣетъ силу законъ, по которому, если къ одному уже существовавшему полю присоединяется новое, вызываемое другими причинами, то эти поля налагаются одно на другое аддитивно, не оказывая вліянія другъ на друга. Такимъ образомъ, напримѣръ, поле, исходящее изъ магнитнаго стержня, не мѣняется подъ вліяніемъ окружающаго его повсюду поля земли, но просто складывается съ нимъ. (Здѣсь имѣется въ виду сложение векторовъ, происходящее по такъ называемому закону параллелограмма векторовъ; см. § 245). Если взятое для сравненія постоянное поле, которое можно было бы принять за единицу, но которое мы для общности обозначимъ черезъ H_1 , расположить такимъ образомъ, чтобы оно оказалось перпендикулярнымъ къ полю земли H , то оба поля вмѣстѣ образуютъ новое поле, составляющее нѣкоторый уголъ α съ первоначальнымъ полемъ земли. Этотъ уголъ α , т. е. уголъ, на который поворачивается стрѣлка изъ ея первоначальнаго положенія подъ вліяніемъ поля H_1 , можетъ быть измѣренъ. По принципу наложенія мы затѣмъ получаемъ $H = H_1 \cdot \cotg \alpha$.

Остается еще выяснить, какимъ образомъ получается поле сравненія для этого крайне удобнаго метода. Если нужно произвести только относительныя измѣренія, то удобнѣе всего воспользоваться постояннымъ прямымъ магнитомъ, устанавливая его на опредѣленномъ разстояніи отъ магнитной стрѣлки. О томъ, какъ цѣлесо-

образнѣ всего опредѣлить единицу поля для абсолютныхъ измѣреній, будетъ рѣчь въ слѣдующей главѣ.

233. Такъ какъ магнитное поле опредѣлено по величинѣ и по

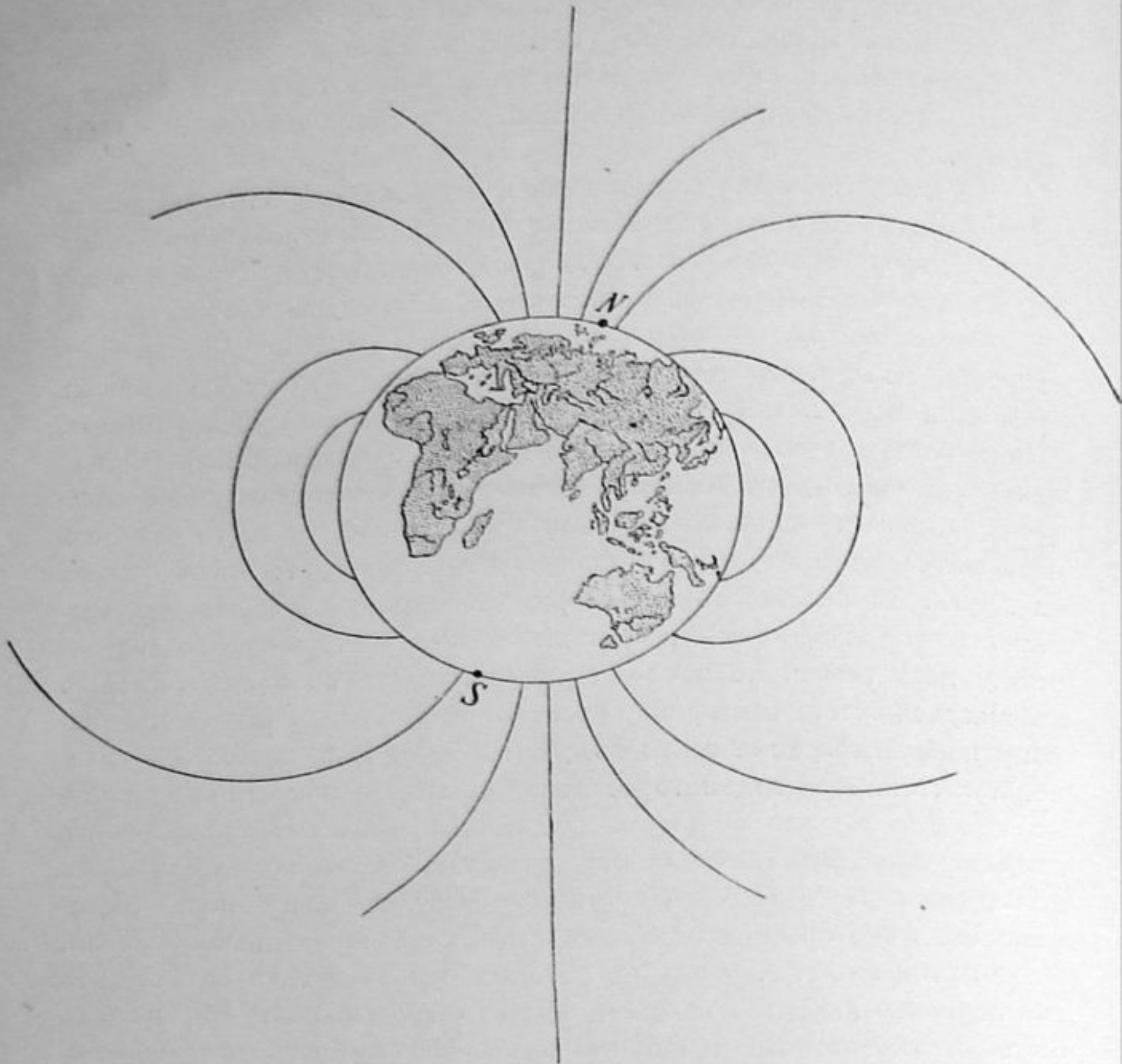


Рис. 150. Магнитное поле земли.

направленію во многихъ мѣстахъ у поверхности земли, то при помощи математическихъ вычисленій можно построить и все поле въ пространствѣ, окружающемъ землю. Получается при этомъ приблизительно картина, воспроизведенная на рис. 150.

Совершенно сходное распределение силовых линий получается вокруг стального шара, по возможности равномерно намагниченного помощью сильного однородного магнитного поля (рис. 151). Однако, намагничение земли не является вполне равномерным. Ея оба магнитные полюса, под которыми мы разумемъ тѣ точки, гдѣ поле направлено строго перпендикулярно къ поверхности земли, лежатъ вблизи географическихъ полюсовъ, но они не лежатъ точно другъ противъ друга, какъ въ случаѣ равномерно намагниченного шара, изображенного на рис. 151. Именно, полюсь I лежитъ подъ $72^{\circ}35'$ южн. шир. и $152^{\circ}30'$ вост. долг. отъ Гринвича, полюсь II — подъ $73^{\circ}35'$ сѣв. шир. и $95^{\circ}39'$ зап. долг. отъ Гринвича.

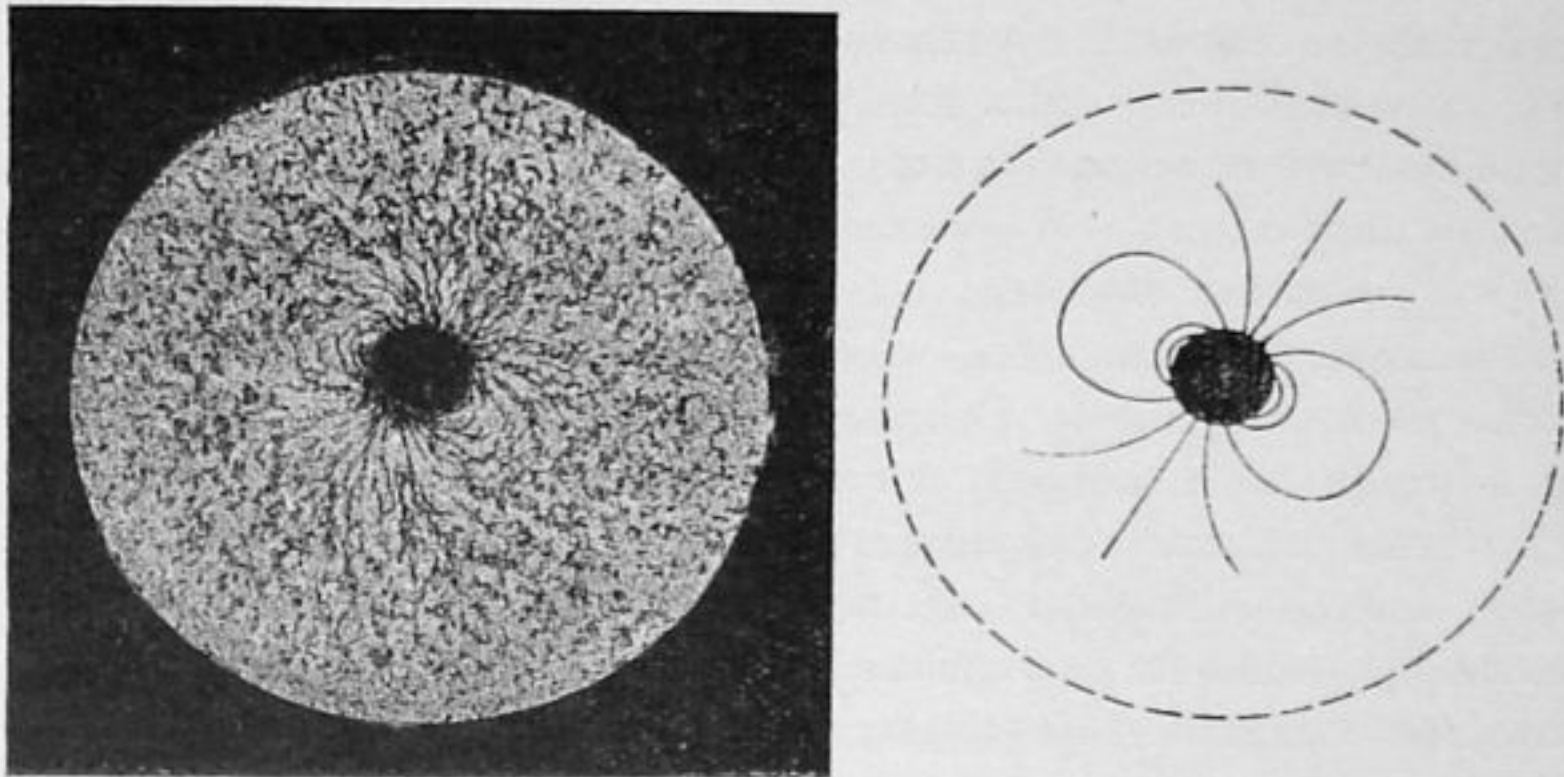


Рис. 151. Поле намагниченного шара.

Надъ магнитнымъ полемъ земли производятся систематическія наблюденья во многихъ обсерваторіяхъ. Эти наблюденья показываютъ, что оно не является постояннымъ. Оно подвергается медленнымъ измѣненіямъ (вѣковыя варіаціи), которыя, накопляясь въ теченіе столѣтій, могутъ достигнуть значительной величины. Ясно, что намагниченіе земли и положеніе магнитныхъ полюсовъ медленно, но непрерывно измѣняются; лучше всего это замѣтно по измѣненію склоненія.

Кромѣ этихъ медленныхъ измѣненій происходятъ также періодическія суточные варіаціи, которыя связаны съ солнечнымъ лучеиспусканіемъ и потому оказываются болѣе значительными и болѣе продолжи-

различаются по своимъ физическимъ свойствамъ, что можно замѣ-
тить уже, напримѣръ, по формѣ кристалла турмалина (рис. 58).
Между тѣмъ полюсы магнита различными являются, такъ сказать,
только математически, какъ положительный и отрицательный.

Нѣкоторые теоретики желали сгладить это различіе и вводили по-
нятія положительнаго и отрицательнаго магнитныхъ „зарядовъ“. Та-
кого рода теоріи можно заранѣе считать бесплодными и неудачными.
Въ слѣдующихъ главахъ мы самыми фактами будемъ приведены къ
общепринятой нынѣ теоріи магнетизма, которая совмѣстима только
съ аксіальнымъ характеромъ магнитнаго состоянія.

ГЛАВА ВТОРАЯ

МАГНИТНОЕ СОСТОЯНИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКІЙ ТОКЪ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ, ОКРУЖАЮЩЕЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКІЙ ТОКЪ.

235. Поднесемъ магнитную стрѣлку къ проволоцѣ, которая соединена съ полюсами мощнаго источника электричества и по которой, слѣдовательно, идетъ постоянный электрический разрядъ. Мы замѣтимъ при этомъ, что на стрѣлку дѣйствуютъ силы, стремящіяся расположить ее поперекъ проволоки. Это „электромагнитное дѣйствіе“ было впервые замѣчено въ 1820 году датскимъ физикомъ Эрстедомъ (Oersted). Это была первая связь между электрическими и магнитными явлениями, которую удалось открыть.

Проводникъ электричества, по которому течетъ электрический токъ, всегда окруженъ магнитнымъ полемъ.

Изслѣдуемъ теперь подробнѣе это поле. Какъ указано выше, магнитная стрѣлка устанавливается въ этомъ полѣ всегда поперекъ проводника, несущаго токъ. Удобнѣе всего это наблюдается, если проволока, по которой течетъ токъ, расположена вертикально. Если обойти вокругъ такой проволоки съ магнитною стрѣлкою и въ каждомъ мѣстѣ отмѣтить направленіе, въ которомъ устанавливается стрѣлка, то получающіяся такимъ образомъ силовыя линіи имѣютъ видъ окружностей, охватывающихъ проволоку. Если помощью коммутатора переменить направленіе тока въ проволоцѣ, то магнитная стрѣлка поворачивается на 180° , т. е. силовыя линіи остаются тѣми же, и только направленіе ихъ мѣняется на обратное. Если установить, въ какую сторону обращенъ положительный полюсъ магнитной стрѣлки, то получается слѣдующее правило, дающее направленіе разсматриваемаго поля.

Силовыя линіи магнитнаго поля, окружающаго проволоку, по которой течетъ электрический токъ, имѣютъ видъ кольца, охватывающихъ проволоку. Направленіе этихъ линій положительное или правое, если смотрѣть по направле-

нию, въ которомъ переносится по проволокъ положительное электричество.

Положительнымъ или правымъ направлениемъ на окружности

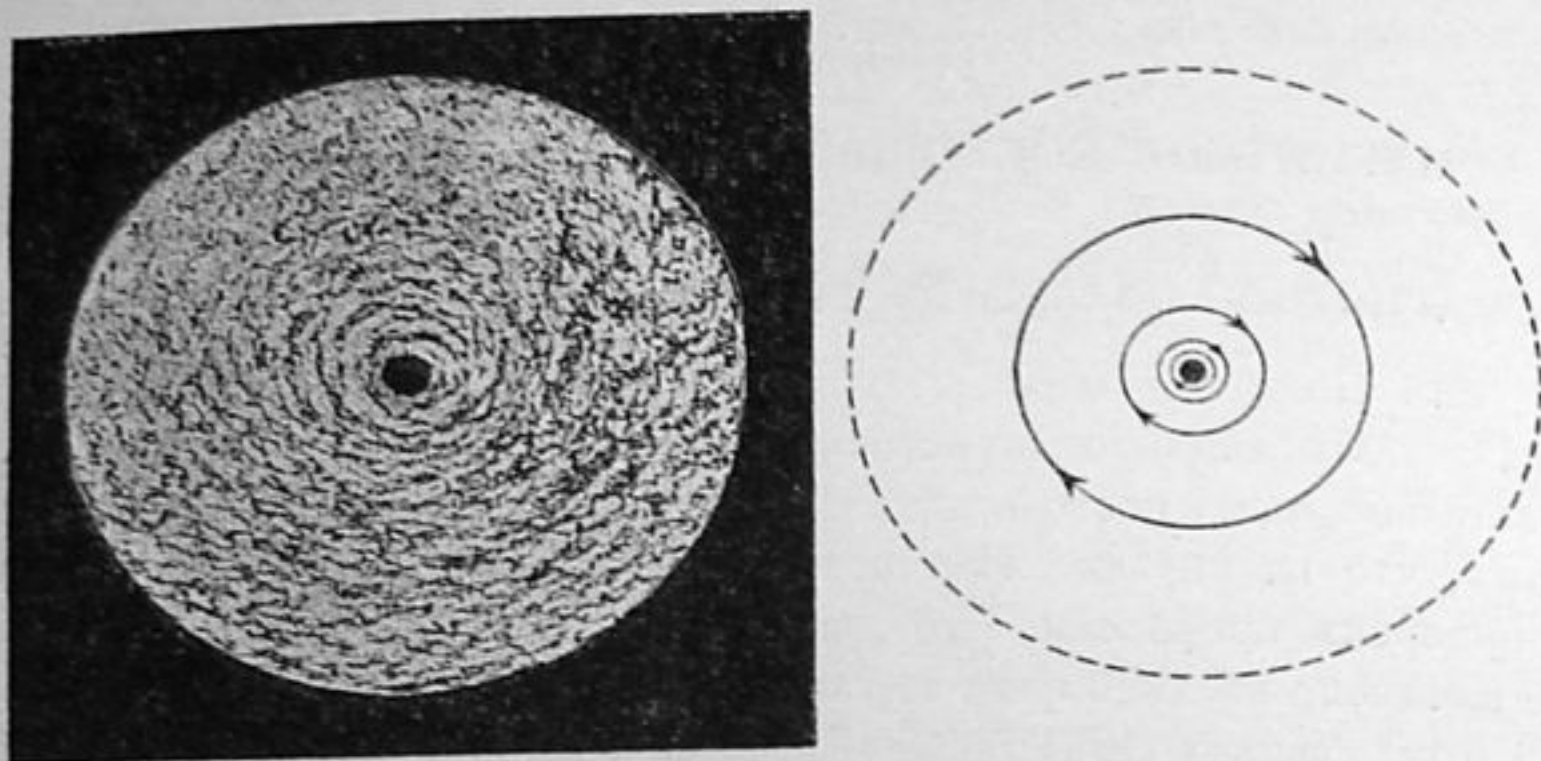


Рис. 152. Магнитное поле, окружающее прямолинейный проводникъ съ токомъ (Проводникъ расположенъ перпендикулярно къ плоскости рисунка, и токъ идетъ сверху внизъ).

(или вообще на замкнутой кривой), называется то направлениемъ, которое совпадаетъ съ направлениемъ движенія часовой стрѣлки.

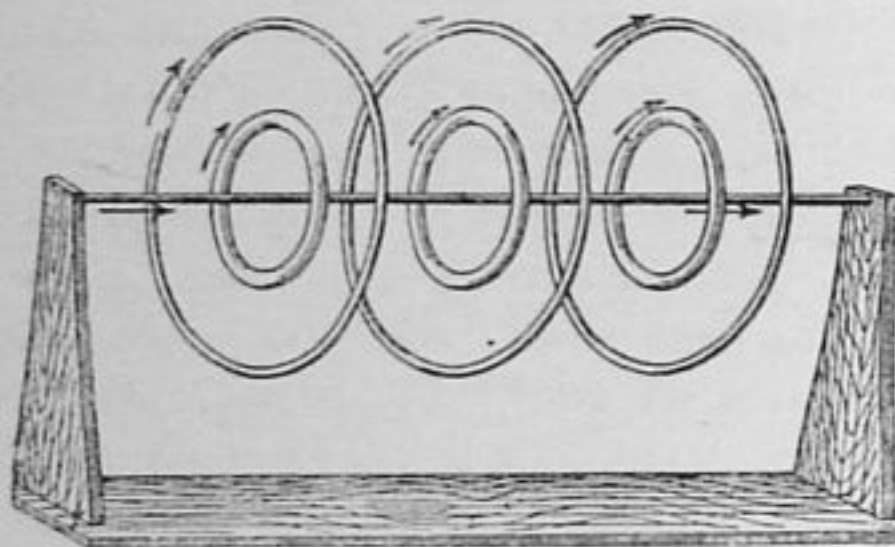


Рис. 153. Модель магнитныхъ силовыхъ линий, окружающихъ прямолинейный проводникъ съ токомъ.

Магнитное поле, окружающее проволоку, по которой течетъ электрический токъ, легко можно зафиксировать помощью желѣзныхъ опилокъ. Для этого проволоку пропускаютъ черезъ отверстие, про-

сверленное въ стеклянной пластинкѣ, такъ чтобы проволока была перпендикулярна къ плоскости пластинки. На стекло насыпаютъ железныхъ опилокъ и пропускаютъ по проволокѣ токъ, потряхивая слегка пластинку. При этомъ опилки располагаются, какъ показываетъ рис. 152, по окружностямъ, охватывающимъ проволоку.

Изображенная на рис. 153 модель показываетъ намъ характеръ поля, окружающаго токъ. Прямой стержень представляетъ здѣсь отръзокъ проводника съ токомъ. Резиновыя кольца укрѣплены помощью тонкихъ проволочекъ такимъ образомъ, что они concentрически окружаютъ стержень; эти кольца изображаютъ отдѣльныя силовыя линіи.

ВРАЩАТЕЛЬНЫЯ ДВИЖЕНІЯ ВЪ ПОЛѢ ТОКА.

236. Та особенность магнитнаго поля тока, что его линіи образуютъ вокругъ провода замкнутыя кривыя безъ начала и безъ конца, влечетъ за собою одно замѣчательное слѣдствіе. Именно, если бы какъ-нибудь возможно было обвести вокругъ провода, несущаго токъ, отдѣльный магнитный полюсъ, то по возвращеніи полюса въ исходную точку должно было бы оказаться, или что затрачена работа, или же что выиграна работа. Если бы полюсъ двигался въ такомъ направленіи, что работа выигрывается, то сила магнитнаго поля поддерживала бы его движеніе, и при достаточно маломъ треніи вращеніе полюса совершалось бы непрерывно. Такой опытъ можно произвести въ дѣйствительности, хотя, какъ мы знаемъ, изолированные магнитные полюсы не существуютъ. Расположеніе опыта указано на рис. 154. Токъ подводится черезъ кольцеобразный желобъ, наполненный ртутью и снабженный винтовымъ зажимомъ; черезъ центръ желоба проходитъ прямолинейный толстый латунный проводъ, соединенный внизу со вторымъ винтовымъ зажимомъ. На верхній конецъ этого латуннаго стержня опи-

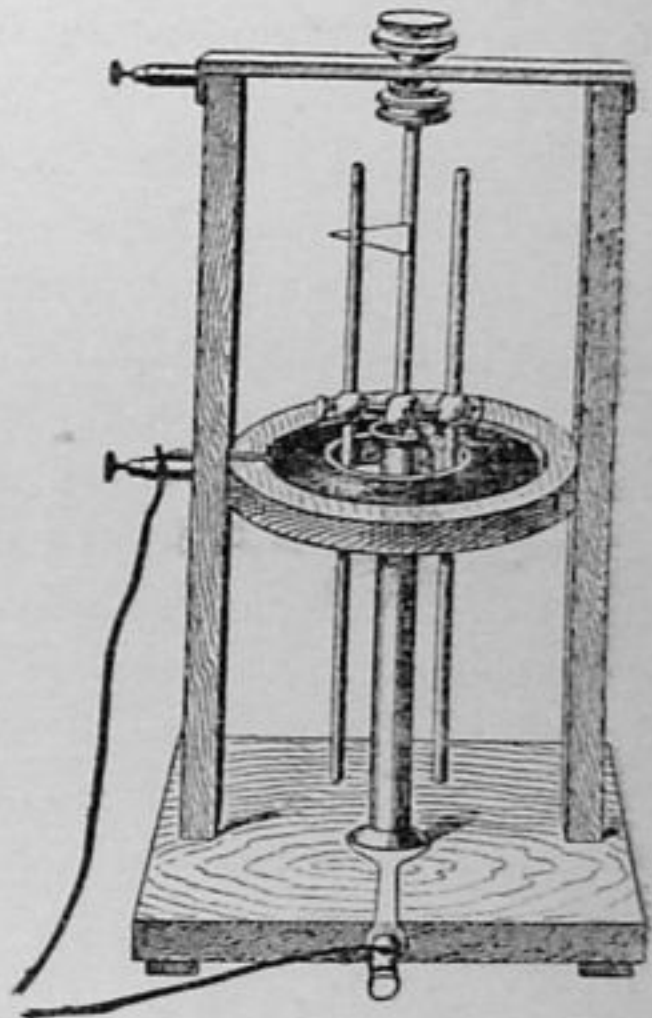


Рис. 154. Вращеніе магнита вокругъ проводника съ токомъ.

рается ось вращенія, составляющая его продолженіе. Къ оси прикрѣплена короткая горизонтальная металлическая проволока, конецъ которой загнуть внизъ и слегка погруженъ во ртуть. Такимъ образомъ, при всякомъ положеніи оси эта проволока образуетъ соединеніе между стержнемъ и желобомъ со ртутью. Кромѣ того, съ осью скрѣплены два параллельные ей прямые магнита, имѣющіе внизу одинаковые полюсы. Если оба винтовые зажима соединить съ батареей, то по латунному стержню потечетъ токъ, и вокругъ него образуются замкнутыя магнитныя силовыя линіи; по вращающейся же оси токъ не будетъ проходить, и вокругъ нея магнитнаго поля не будетъ. На оба нижніе одноименные магнитные полюса дѣйствуетъ при этомъ сила поля, окружающаго проводъ, верхніе же полюсы лежатъ внѣ поля и не испытываютъ никакого силового дѣйствія. Поэтому ось вращенія, съ которой скрѣплены оба магнита, приходитъ во вращательное движеніе и вращается непрерывно съ опредѣленной скоростью, при чемъ дѣйствующая на магниты сила какъ разъ преодолеваетъ треніе.

Это явленіе замѣчательно тѣмъ, что здѣсь эфиръ доставляетъ энергію въ формѣ работы, хотя магнитные полюсы описываютъ замкнутые пути, и потому магнитное поле не испытываетъ никакихъ длительныхъ измѣненій. Магнитное поле тока этимъ существенно отличается отъ стационарнаго электрическаго поля, изъ котораго никакъ нельзя извлечь работу посредствомъ движенія электрически заряженныхъ тѣлъ по замкнутымъ путямъ (§ 25). Однако и въ магнитномъ полѣ такое полученіе работы возможно лишь въ томъ случаѣ, когда полюсъ передвигается вокругъ провода, несущаго токъ. Это слѣдуетъ себѣ представлять такъ, что небольшая доля потока энергіи, переносимаго эфиромъ изъ источника электричества въ проводъ и превращающагося въ немъ въ теплоту, захватывается магнитнымъ полюсомъ прежде, чѣмъ она достигаетъ провода и переводится въ механическую работу. Отчетливѣе понять это явленіе можно, только познакомившись съ такъ называемой индукціей. Кромѣ того слѣдуетъ замѣтить, что изображенный на рис. 154 простой моторъ долженъ имѣть подвижной контактъ или, какъ обычно говорятъ, скользящій контактъ, именно — ртутный желобъ съ погруженной въ него проводочкой. Моторы постояннаго тока, т. е. такіе моторы, которые работаютъ при помощи силовыхъ дѣйствій магнитнаго поля стационарнаго тока, невозможно строить безъ какихъ-либо подвижныхъ

контактовъ, такъ какъ невозможно пользоваться отдѣльнымъ магнитнымъ полюсомъ.

ПРИМѢРЫ МАГНИТНЫХЪ ПОЛЕЙ ТОКА.

237. Мы рассмотримъ теперь для нѣсколькихъ важныхъ случаевъ все магнитное поле, возбуждаемое цѣпью электрическаго тока. Какъ первый примѣръ, возьмемъ параллельные провода, помощью которыхъ производится электрическая передача энергии на большое разстояніе. Мы имѣемъ въ этомъ случаѣ двѣ параллельныя проволоки; одна изъ нихъ несетъ опредѣленный токъ въ положительномъ направленіи, другая — тотъ же токъ въ отрицательномъ направленіи.

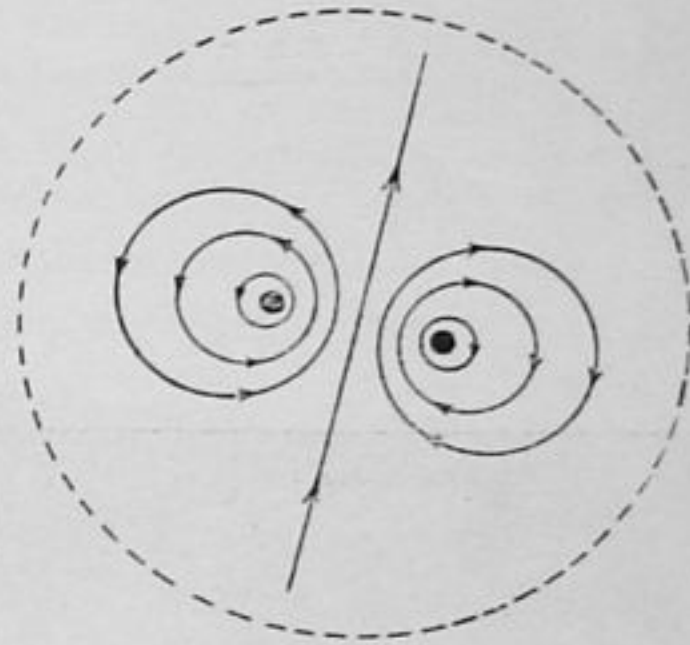
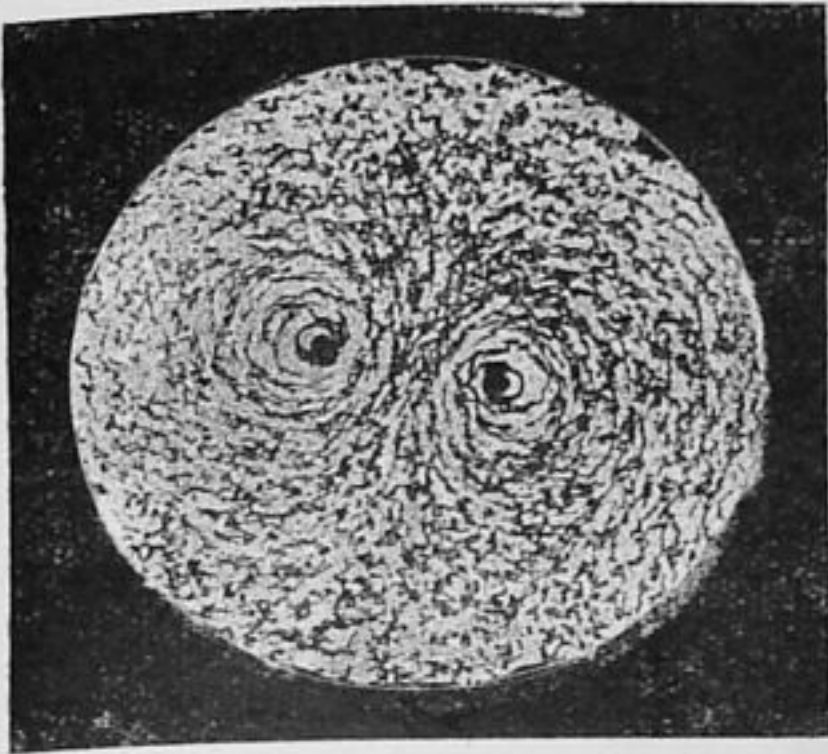


Рис. 155. Магнитное поле тока около параллельныхъ проводниковъ.

Если просверлить въ стеклянной пластинкѣ два отверстія, протянуть черезъ нихъ разсматриваемыя проволоки, насыпать на стекло желѣзныхъ опилокъ и пропустить по проволокамъ токъ, слегка потряхивая въ то же время пластинку, то получается картина поля, представленная на рис. 155. Изъ пространства, лежащаго между обѣими проволоками, выходятъ въ одну сторону силовыя линіи; половина ихъ заворачивается направо и окружаетъ одну изъ проволокъ, половина — налево и окружаетъ другую проволоку. Затѣмъ всѣ онѣ вновь входятъ съ противоположной стороны въ промежуточное между проволоками пространство.

Совершенно подобнымъ же образомъ располагаются магнитныя силовыя линіи около круговаго тока. На рис. 156 представлена мо-

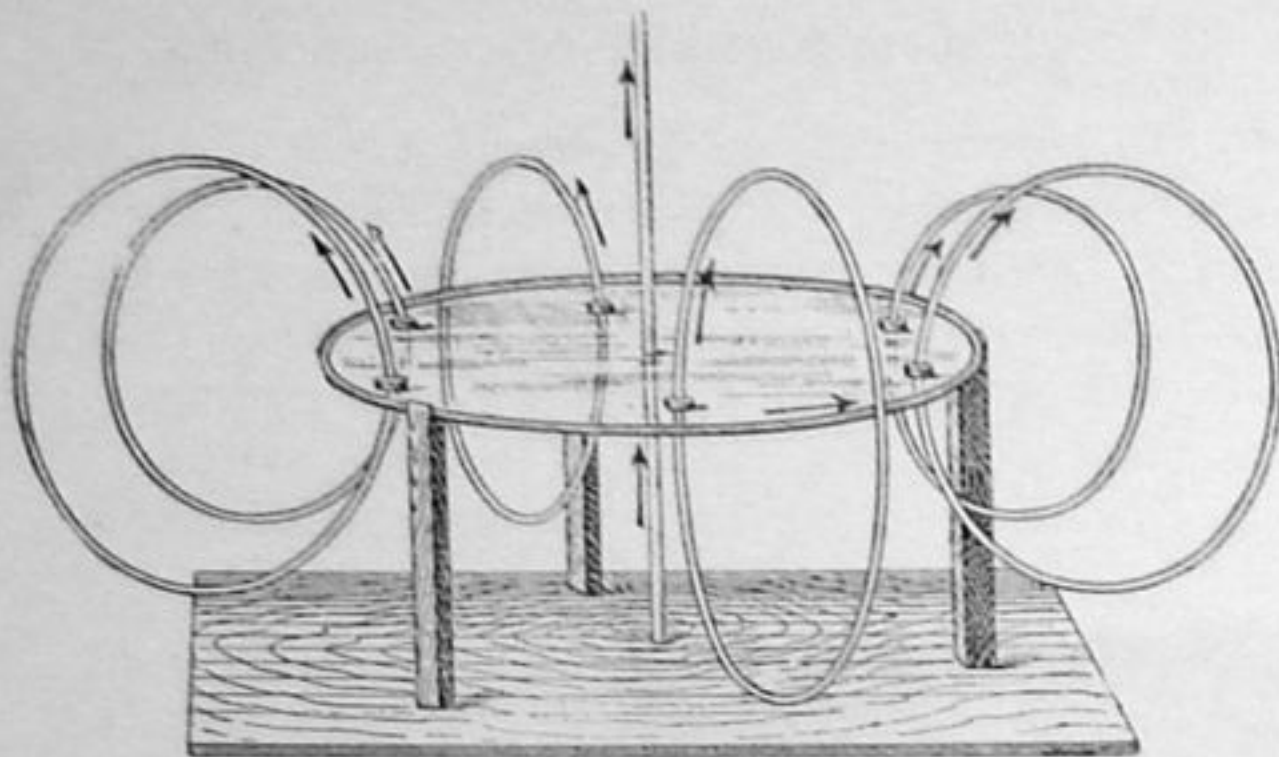


Рис. 156. Модель магнитныхъ силовыхъ линій, окружающихъ круговой токъ.

дель такого распредѣленія силовыхъ линій. Какъ и на рис. 153, здѣсь изображены нѣсколько силовыхъ линій при помощи резино-

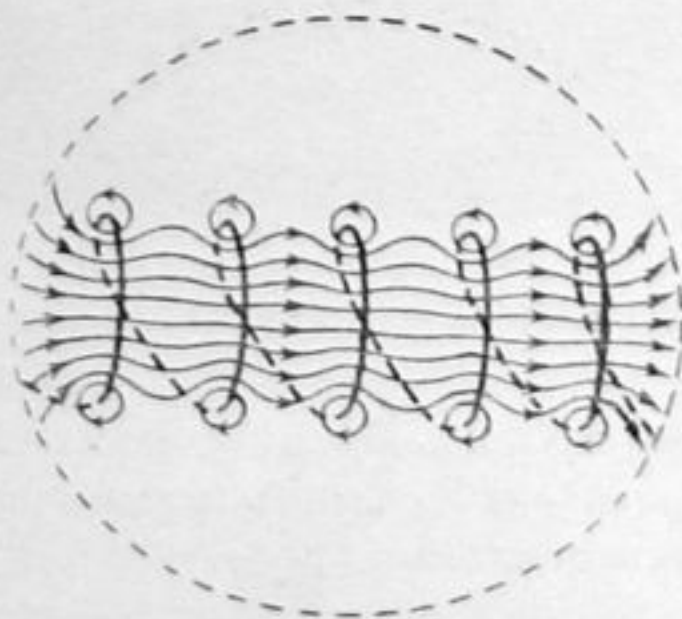
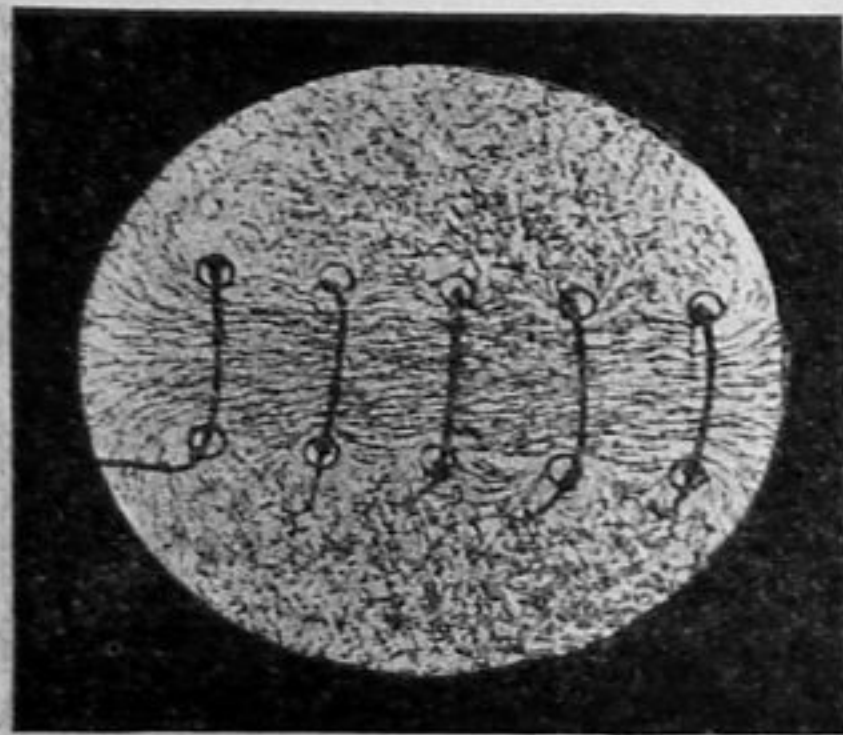


Рис. 157. Изображеніе поля соленоида.

выхъ колець. На этой модели ясно видно, что силовыя кольца выходятъ съ одной стороны замкнутаго кольца, несущаго токъ, огибаютъ проводникъ и, возвращаясь съ противоположной стороны,

смыкаются. Распределение силовыхъ линий въ полѣ кругового тока совершенно тождественно съ ихъ распределеніемъ вокругъ намагниченнаго круга, имѣющаго съ одной стороны положительный магнетизмъ, съ другой — отрицательный.

Такъ называемый соленоидъ, т. е. катушку, имѣющую круговое сѣченіе, можно разсматривать, какъ состоящую изъ ряда круговыхъ колецъ, надвинутыхъ на поверхность цилиндра. Если черезъ соленоидъ пропустить токъ, то возникаетъ магнитное поле, изображенное на рис. 157. Внутри соленоида силовыя линіи идутъ почти прямолинейно и параллельно оси соленоида. Выходя съ одного конца соленоида, онѣ круто загибаются назадъ и снова входятъ въ него съ другого конца. Видъ магнитнаго поля внѣ соленоида тождественъ съ видомъ поля прямого магнита. Распределение силовыхъ линий въ пространствѣ для этого случая представлено на модели, изображенной на рис. 158. Внутри соленоида силовыя линіи тѣмъ ближе къ прямымъ линіямъ, чѣмъ тоньше и тѣснѣе расположены витки соленоида, т. е. чѣмъ равномернѣе распределяется токъ по поверхности цилиндра. Внутри очень длиннаго и тонкаго цилиндра, на поверхности котораго электрической токъ распределяется съ совершенно равномерной плотностью, магнитное поле вполнѣ параллельно оси соленоида и вполнѣ равномерно по силѣ (однородно). Это обстоятельство будетъ имѣть важное значеніе въ послѣдующемъ.

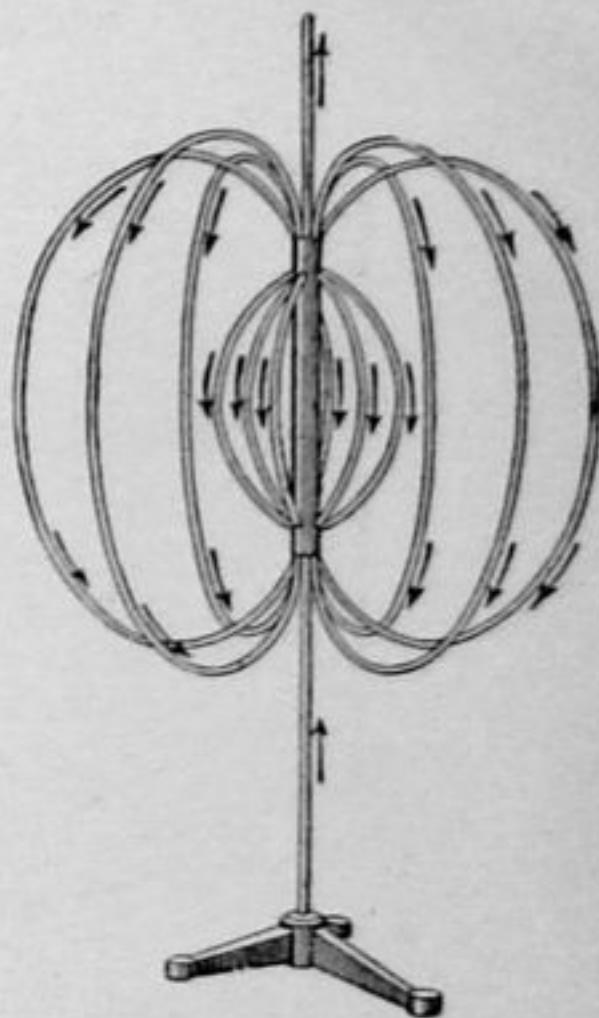


Рис. 158. Модель внѣшняго поля соленоида.

ЭЛЕКТРОМАГНИТЬ.

238. Мы видѣли въ § 225, что кусокъ мягкаго желѣза, внесенный въ магнитное поле, самъ становится магнитомъ. Для намагничиванія желѣза можно воспользоваться также магнитнымъ полемъ тока. Удобнѣе всего примѣнить съ этой цѣлью поле цилиндрической катушки, вставляя въ нее брусокъ желѣза. Намагниченіе желѣзнаго бруска внутри катушки легко демонстрировать на слѣдующемъ про-

стомъ опытѣ. Помѣстимъ магнитную стрѣлку на такомъ разстояніи отъ катушки съ токомъ, чтобы она подвергалась лишь незначительному силовому дѣйствию магнитнаго поля тока. Если затѣмъ ввести внутрь катушки брусокъ мягкаго желѣза, то по движеніямъ стрѣлки мы тотчасъ замѣтимъ, что появилось сильное магнитное поле. Сравнительно слабое поле внутри катушки сдѣлало желѣзный брусокъ чрезвычайно сильнымъ магнитомъ. Если токъ въ катушкѣ прекратить,

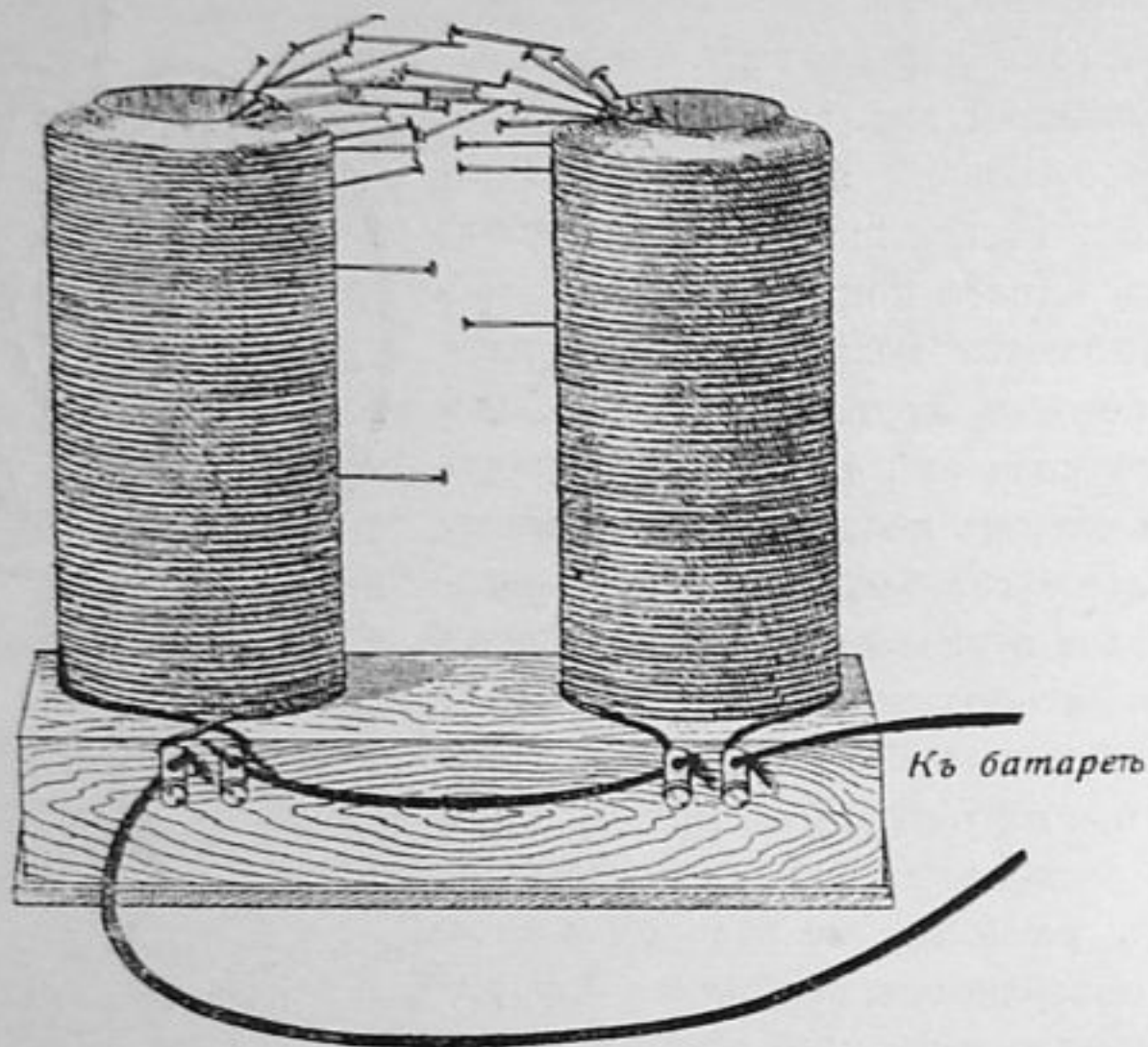


Рис. 159. Электромагнитъ и большія тяжелыя булавки.

то по магнитной стрѣлкѣ видно, что и поле тотчасъ же исчезаетъ. Какъ мы уже знаемъ (§ 225), намагниченіе въ желѣзѣ не сохраняется.

Желѣзный брусокъ, окруженный катушкой съ токомъ и намагничиваемый магнитнымъ полемъ тока, называютъ электромагнитомъ.

Электромагнитъ обладаетъ двумя свойствами, дѣлающими его крайне удобнымъ для многихъ примѣненій. Во-первыхъ, замыкая и размыкая токъ, идущій по намагничивающей катушкѣ, можно произвольно возбуждать и пре-

кращать его магнитное состояніе. Во-вторыхъ, электромагнитъ гораздо сильнѣе стального магнита, имѣющаго одинаковыя съ нимъ размѣры.

На рис. 159 изображенъ большой электромагнитъ, поле котораго поддерживаетъ въ воздухѣ дугу изъ большихъ тяжелыхъ гвоздей. Такихъ силовыхъ дѣйствій никоимъ образомъ нельзя получить при помощи стальныхъ магнитовъ. Если къ полюсамъ такого электромагнита приложить желѣзную полосу, то ее удастся оторвать отъ нихъ только съ большимъ усиленіемъ. Кромѣ того, поле такого большого

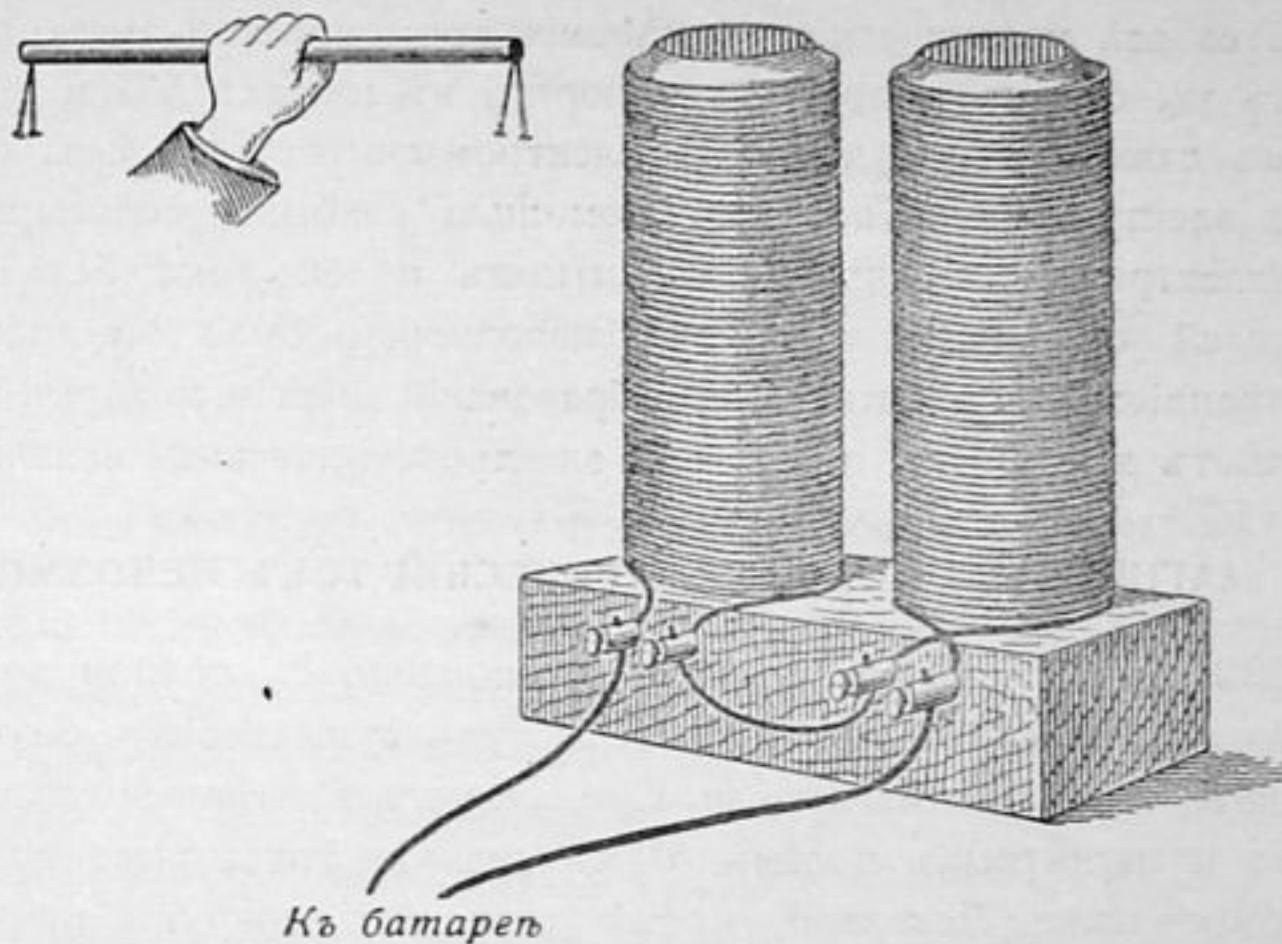


Рис. 160. Магнитная индукція въ полѣ большого электромагнита.

электромагнита весьма далеко распространяется въ окружающемъ пространствѣ. Если держать въ нѣкоторомъ отдаленіи отъ электромагнита желѣзную полосу, располагая ее въ направленіи силовыхъ линій, то она такъ сильно намагничивается, что къ ея полюсамъ можно подвѣсить по нѣскольку гвоздей (рис. 160). Наиболѣе удобный способъ полученія постоянныхъ магнитовъ состоитъ въ томъ, что стальную полосу, которую хотятъ намагнитить, помещаютъ въ сильное поле электромагнита. Здѣсь она тотчасъ же намагничивается и подъ дѣйствіемъ коэрцитивной силы сохраняетъ магнитныя свойства и по удаленіи изъ поля.

Еще бóльшія силовыя дѣйствія можно получить, если постараться сосредоточить поле электромагнита въ тѣхъ мѣстахъ, гдѣ имъ нужно воспользоваться. Иногда къ цѣпямъ подъемныхъ крановъ въ тѣхъ случаяхъ, когда приходится поднимать желѣзныя тяжести (балки, рельсы и т. п.), вмѣсто крюка подвѣшиваютъ электромагнитъ. Приблизивъ его къ тяжести, которую нужно поднять, замыкаютъ токъ; тогда грузъ, даже весьма тяжелый, прочно пристаеетъ къ электромагниту и можетъ быть поднятъ. Чтобы отцѣпить грузъ, достаточно прервать намагничивающій токъ.

На колоссальныхъ силовыхъ дѣйствіяхъ электромагнитовъ основываются всѣ механическія примѣненія электрической энергіи, о которыхъ мы будемъ подробнѣе говорить въ главахъ VII и VIII. Мы можемъ даже сказать, что безъ электромагнитовъ не была бы возможна электротехника вообще: помощью слабыхъ силовыхъ дѣйствій электрическихъ полей, магнитныхъ полей тока безъ желѣза или полей стальныхъ магнитовъ невозможно было бы достигнуть тѣхъ грандіозныхъ дѣйствій и преобразованій энергіи, которыя именно и дѣлаютъ выгоднымъ примѣненіе электротехническихъ механизмовъ.

БЕЗЪ МАГНИТНАГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКІЙ ТОКЪ НЕВОЗМОЖЕНЪ.

239. Безчисленными опытами установлено съ полной достовѣрностью, что электрическіе токи не могутъ существовать безъ окружающаго ихъ магнитнаго поля. Существуетъ тѣснѣйшая связь между токомъ и магнитнымъ полемъ. Чѣмъ сильнѣе токъ, тѣмъ сильнѣе и магнитное поле. Доказано, кромѣ того, что вокругъ проводника опредѣленной формы при опредѣленной силѣ тока всегда возникаетъ совершенно опредѣленное магнитное поле, независимо отъ того, изъ какого матеріала сдѣланъ проводникъ, т.-е. независимо отъ его сопротивленія и отъ величины напряженія, вызывающаго токъ.

Сила магнитнаго поля, окружающаго токъ, является мѣрою силы электрическаго разряда въ проводникѣ.

Мы видѣли, что электрической токъ представляетъ собою не что иное, какъ непрерывное разрушеніе электрическаго поля въ проводникѣ, при чемъ поле одновременно возстанавливается посредствомъ нѣкоторыхъ процессовъ въ эфирѣ, о которыхъ мы до сихъ поръ еще ничего не знали. Установленная нами только-что закономѣрная зависимость между магнитнымъ полемъ и электрическимъ разрядомъ дѣлаеетъ не-

сомнѣннымъ, что указанное дѣйствіе вызывается именно магнитнымъ состояніемъ ээира.

Въ магнитномъ полѣ тока имѣютъ мѣсто тѣ процессы, которые непрерывно возстанавливаютъ разрушающіяся въ проводникѣ электрическія напряженія.

Мы можемъ съ полнымъ правомъ сказать, что электрической токъ безъ магнитнаго поля невозможенъ. Совсѣмъ другой вопросъ, можетъ ли существовать магнитное поле, не связанное съ электрическимъ токомъ. Существованіе постоянныхъ магнитовъ даетъ какъ будто положительный отвѣтъ на этотъ вопросъ. Однако, какъ мы увидимъ ниже, существуютъ вѣскія основанія предполагать, что магнитъ въ сущности представляетъ собой скрытые молекулярные токи, которые и обнаруживаются магнитными дѣйствіями. Если это справедливо, то мы можемъ сказать, что не существуетъ также и магнитнаго поля безъ электрическаго тока. Иными словами, магнитное поле и электрической токъ представляютъ собою лишь различныя проявленія одного и того же процесса въ ээирѣ.

ИЗМѢРИТЕЛИ ТОКА СЪ ПОДВИЖНЫМЪ МАГНИТОМЪ.

240. Изъ вышеизложеннаго слѣдуетъ, что въ магнитномъ полѣ мы имѣемъ средство, позволяющее намъ непосредственно измѣрять силу тока. Для этой цѣли нужно магнитное поле тока ввести внутрь инструмента, дающаго возможность судить объ его силѣ по тому дѣйствию, которое испытываетъ въ немъ магнитъ.

Всякій такой инструментъ, служащій для измѣренія силы тока, состоитъ изъ двухъ существенныхъ частей—катушки, обмотанной проволокой, концы которой соединены съ двумя зажимами, и подвижного магнита, отклоняющагося отъ своего положенія равновѣсія подъ дѣйствіемъ поля тока, проходящаго по обмоткѣ катушки. Эта сила тока уравниваетъ непрерывно дѣйствующую на магнитъ направляющую силу, которая стремится возвратитъ его въ первоначальное положеніе. Чтобы измѣрить силу тока, разъединяютъ въ какомъ-нибудь мѣстѣ цѣпь, по которой проходитъ токъ, и вводятъ въ нее катушку измѣрителя силы тока такъ, чтобы по ея обмоткѣ проходилъ тотъ же токъ, что и по всей остальной цѣпи. При этомъ опредѣленной силѣ тока соотвѣтствуетъ опредѣленное отклоненіе магнита; послѣднее тѣмъ больше, чѣмъ сильнѣе токъ.

На рис. 161 изображенъ весьма простой типъ такого измѣрителя силы тока. Катушка этого прибора раздѣлена на двѣ части, и онъ снабженъ поэтому четырьмя винтовыми зажимами, соединенными съ концами обѣихъ обмотокъ. Обѣ катушки можно соединять,

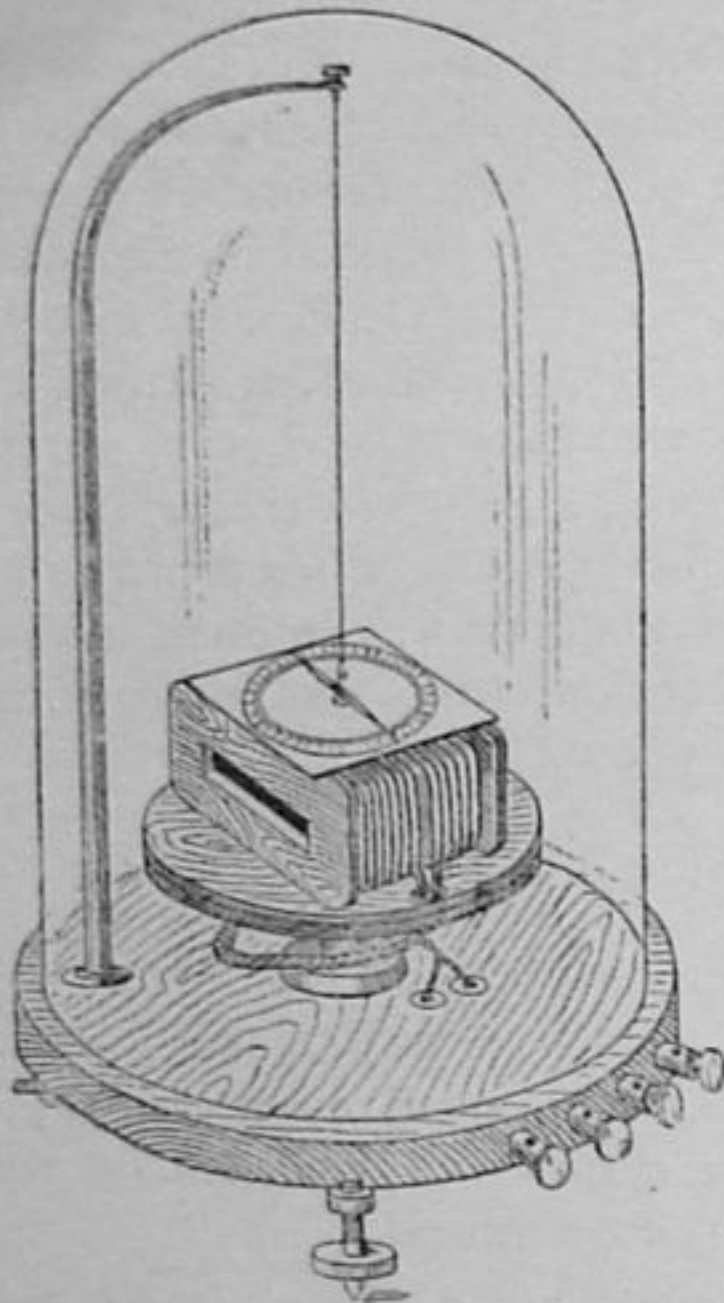


Рис. 161. Гальванометръ со стрѣлкою.

смотря по надобности, послѣдовательно или параллельно. Если черезъ катушки идетъ токъ, то въ узкомъ пространствѣ, окруженномъ оборотами проволоки, образуется почти однородное поле, силовыя линіи котораго направлены перпендикулярно къ плоскости оборотовъ. Въ этомъ пространствѣ помещается магнитная стрѣлка, на рис. 161, понятно, не видимая. Ее подвѣшиваютъ на тонкой нити такъ, чтобы она могла легко вращаться. Эта магнитная стрѣлка скрѣплена помощью проволочнаго стерженька, выступающаго черезъ небольшое отверстіе изъ катушки, съ указателемъ, показывающимъ на раздѣленномъ кругѣ величину отклоненія стрѣлки отъ ея нулевого положенія. На рис. 161 видно, какъ неизмѣняемая система (стрѣлка и указатель) при помощи крючечка подвѣшивается къ упомянутой тонкой нити. Направляющей

силой въ этомъ простомъ приборѣ является магнитное поле земли, въ нашихъ странахъ достаточно постоянное. Катушка прибора должна быть установлена такимъ образомъ, чтобы поле тока было перпендикулярно къ полю земли, т.-е. такъ, чтобы при отсутствіи тока въ катушкѣ магнитная стрѣлка располагалась въ плоскости ея оборотовъ. Поэтому катушка такого прибора помещается на столикѣ, который можно поворачивать.

241. Только случайности, которой мы вообще обязаны многими курьезами въ номенклатурѣ, нужно приписать то обстоятельство, что описанный измѣритель силы тока получилъ названіе гальванометра.

Гальвани самъ и не подозрѣвалъ о существованіи магнитнаго поля тока, и конструкція этого прибора совершенно не находится въ какой-либо связи съ открытымъ Гальвани явленіемъ, если не считать того, что при помощи открытыхъ вслѣдъ затѣмъ Вольта гальваническихъ цѣпей впервые стало возможнымъ экспериментированіе съ длительными электрическими токами. Болѣе уместно было бы называть этотъ инструментъ по имени Эрстеда или же „магнитометромъ“ по аналогіи съ „электрометромъ“; тѣмъ не менѣе этотъ приборъ обычно называется гальванометромъ. Гальванометръ, градуированный, какъ ниже будетъ описано, называется амперметромъ (отъ единицы силы тока—амперъ).

Въ частностяхъ отдѣльные типы гальванометровъ могутъ значительно различаться между собою. Чтобы имѣть по возможности небольшой и все же чувствительный индикаторъ для магнитнаго поля, вмѣсто стрѣлки, встрѣчающейся у старыхъ приборовъ, теперь употребляютъ либо намагниченную круглую пластинку или кольцо, причемъ полюсы лежатъ на противоположныхъ концахъ одного діаметра, либо же небольшой подковообразный магнитъ съ сильно сближенными полюсами, которому придаютъ видъ маленькаго колокола. Если нужно построить магнитъ возможно малой массы для особо чувствительнаго инструмента, который позволялъ бы обнаруживать весьма слабыя силовыя дѣйствія, то къ легкому стерженьку прикрѣпляютъ рядомъ, какъ это видно на рис. 162, нѣсколько маленькихъ кусочковъ тонкой часовой пружины и намагничиваютъ ихъ въ направленіи, перпендикулярномъ къ стерженьку, который служитъ осью вращенія.

Отклоненіе магнита тоже можно наблюдать разными способами. Въ нѣкоторыхъ приборахъ, какъ, на примѣръ, въ томъ, который изображенъ на рис. 161, и во всѣхъ градуированныхъ инструментахъ—амперметрахъ—пользуются стрѣлкой-указателемъ. Въ другихъ приборахъ къ магниту прикрѣплено, какъ это изображено на рис. 162, небольшое зеркальце, отклоненія котораго наблюдаютъ въ трубу, пользуясь отражающейся въ немъ миллиметровой шкалой. Такіе инструменты употребляются только въ лабораторіяхъ, гдѣ ихъ можно въ любое время вновь проградуировать. Большая чувствительность достижима только при употребленіи зеркальныхъ инструментовъ.

Въ различныхъ приборахъ пользуются разнообразной направляющей силой, стремящейся удержать магнитъ въ опредѣленномъ нулевомъ положеніи. Съ этой цѣлью въ старыхъ инструментахъ, въ

родъ изображеннаго на рис. 161, примѣнялось магнитное поле земли, на это сопряжено съ нѣкоторыми неудобствами. Инструменты со стрѣлкою, для того чтобы ими удобно было пользоваться, должны быть годны къ употребленію во всякомъ положеніи безъ предварительной

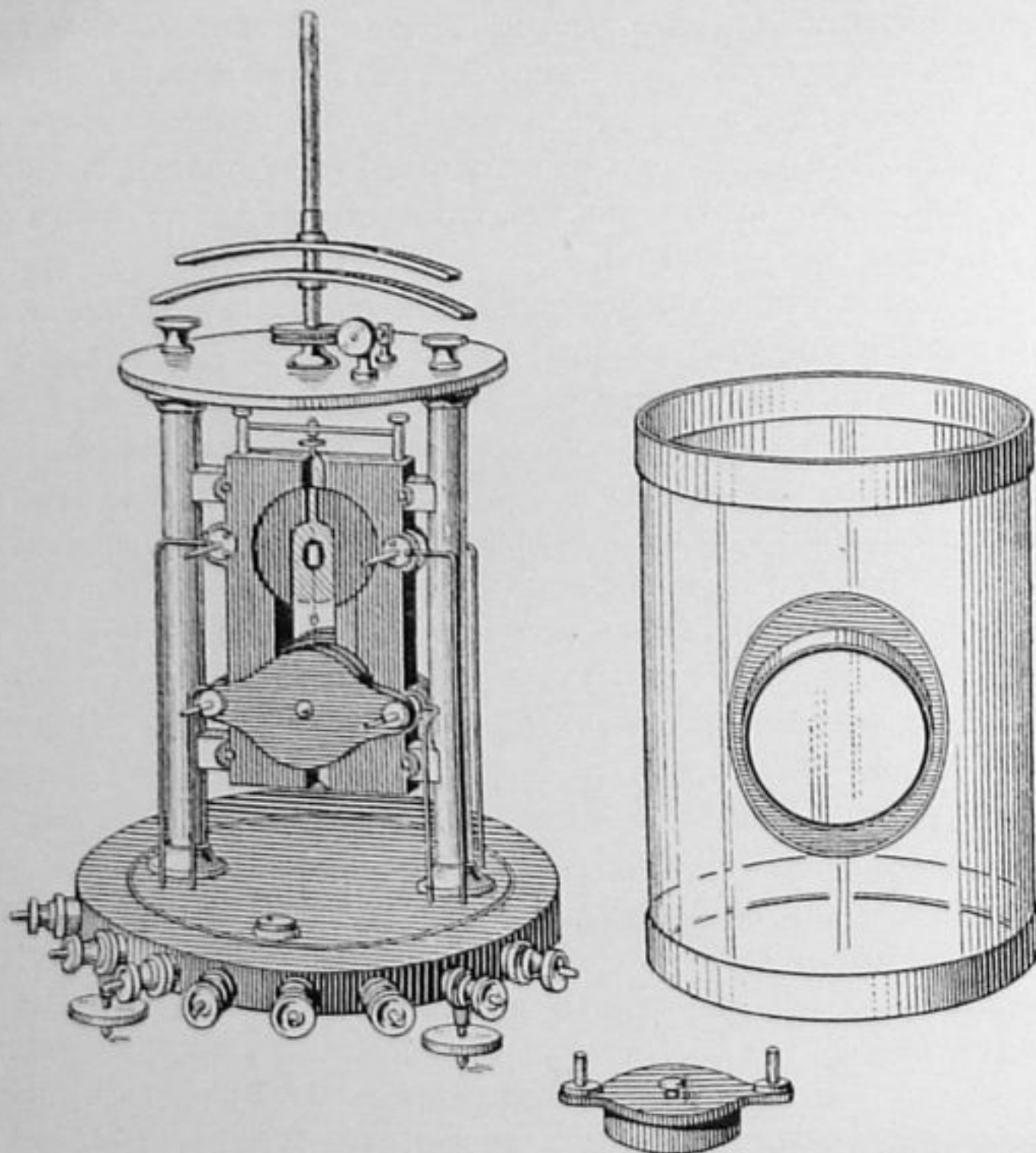


Рис. 162. Гальванометръ Томсона съ четырьмя катушками.

оріентировки относительно поля земли, какъ того требуетъ гальванометръ, изображенный на рис. 161. Кромѣ того, сила земного поля въ различныхъ мѣстахъ весьма различна и даже въ одномъ и томъ же мѣстѣ измѣняется, какъ мы знаемъ, съ теченіемъ времени. Но самое большое неудобство происходитъ отъ того, что на магнитное поле земли оказываютъ сильное вліяніе большія массы желѣза, которыя входятъ въ

составъ машинъ и аппаратовъ на заводахъ и въ лабораторіяхъ, и не всегда установлены неподвижно.

По этимъ причинамъ инструментъ, въ которомъ направляющей силой служить сила земного магнетизма, невозможно проградуировать такъ, чтобы онъ всегда давалъ вѣрныя показанія; такой инструментъ не можетъ, слѣдовательно, служить амперметромъ. Въ нѣкоторыхъ инструментахъ вмѣсто поля земли пользуются искусственнымъ магнитнымъ полемъ, напримѣръ, полемъ сильнаго подковообразнаго магнита, по сравненію съ которымъ земное поле является исчезающе слабымъ. Въ другихъ инструментахъ магнитъ удерживается въ своемъ начальномъ положеніи помощью пружины, упругая сила которой настолько превосходитъ направляющую силу земного поля, что послѣднюю по сравненію съ ней можно принять равной нулю. Въ тѣхъ инструментахъ, которые при употребленіи находятся всегда въ вертикальномъ положеніи, какъ, напримѣръ, въ инструментахъ распредѣлительныхъ досокъ, удобно въ качествѣ направляющей силы использовать силу тяжести. Съ этой цѣлью магнитъ подвѣшивается на горизонтальной оси, при чемъ его центръ тяжести лежитъ ниже этой оси, какъ въ вѣсахъ.

Съ другой стороны, и въ весьма чувствительныхъ гальванометрахъ, предназначенныхъ для лабораторій, также стараются избавиться отъ дѣйствія направляющей силы земного поля. Причиной этого является то обстоятельство, что инструменты, на магниты которыхъ дѣйствуетъ земное поле, могутъ обладать лишь относительно малой чувствительностью. Для достиженія весьма высокой чувствительности, нужно пользоваться гораздо болѣе слабыми направляющими силами. Можно, напримѣръ, уменьшить силу земного поля до нѣкоторой малой ея доли при помощи прямого магнита, укрѣпленнаго на гальванометрѣ въ опредѣленномъ разстояніи отъ подвижнаго магнита. Чрезвычайно чувствительные инструменты получаютъ, если при помощи толстой желѣзной оболочки („панцырной защиты“) отгородить заключенное въ ней пространство отъ земного поля и возбудить въ этомъ пространствѣ при помощи особыхъ магнитовъ искусственное направляющее поле, которое можно сдѣлать сколь угодно слабымъ. Удобнѣе всего, какъ оказалось на практикѣ, придавать желѣзнымъ оболочкамъ форму полыхъ шаровъ. Снабженные такими оболочками инструменты носятъ названіе шаровыхъ панцырныхъ гальванометровъ. Панцырные гальванометры, подобно электри-

чески защищеннымъ электрометрамъ, описаннымъ на стр. 79 первой части, имѣютъ то преимущество, что на нихъ не оказываютъ вліянія внѣшнія поля; въ нихъ почти совершенно не проникаютъ поля большихъ желѣзныхъ массъ, электрическихъ дорогъ и вообще установокъ сильнаго тока. Наконецъ, весьма важнымъ типомъ инструмента съ чрезвычайно малой направляющей силой являются еще такъ называемые астатическіе гальванометры; особенно точные инструменты такого типа были построены В. Томсономъ (лордомъ Кельвиномъ). Въ этихъ инструментахъ къ твердому стерженьку прикрѣплены одинъ надъ другимъ два магнита. Оба магнита дѣлаются по возможности одинаковыми и располагаются такъ, что надъ сѣвернымъ полюсомъ одного приходится южный полюсъ другого, благодаря чему почти совершенно уничтожается вліяніе земного поля. Такую систему магнитовъ называютъ астазированной. Небольшую разницу въ силѣ обоихъ магнитовъ компенсируютъ при помощи двухъ магнитовъ, укрѣпленныхъ надъ гальванометромъ на вертикальной штангѣ такъ, что ихъ можно передвигать внизъ и вверхъ и поворачивать (рис. 162). Помощью этихъ магнитовъ можно достигнуть того, чтобы поля, окружающія оба магнитика гальванометра, немного разнились между собой и чтобы эта разница въ силахъ полей была какъ разъ противоположна разности силъ полюсовъ самихъ магнитиковъ, такъ что направляющая сила станетъ ничтожно малой. Когда такое состояніе достигнуто, то это обнаруживается по тому, что колебанія, совершаемая астатической системой магнитиковъ около вертикальной оси, становятся весьма медленными. Чѣмъ больше періодъ этихъ колебаній, тѣмъ чувствительнѣе инструментъ. Въ гальванометрѣ Томсона каждый изъ астазированныхъ магнитиковъ находится внутри пары катушекъ. Такимъ образомъ инструментъ имѣетъ всего четыре катушки и, соотвѣтственно этому, восемь зажимовъ. Включеніе этого гальванометра должно производиться, конечно, такимъ образомъ, чтобы оба магнитика отклонялись въ одну и ту же сторону подъ дѣйствіемъ полей тока въ соотвѣтствующихъ катушкахъ. Слѣдовательно, эти поля должны имѣть взаимно противоположныя направленія въ верхней и нижней парахъ катушекъ. Во всѣхъ гальванометрахъ съ высокой чувствительностью для подвѣшиванія магнитиковъ употребляются тончайшія кварцевыя нити, у которыхъ сопротивленіе закручиванію ничтожно мало.

Въ нѣкоторыхъ амперметрахъ вмѣсто постоянного магнита внутри катушки употребляютъ тѣло изъ мягкаго желѣза. Поле тока дѣлаетъ желѣзо магнитомъ и затѣмъ вызываетъ его отклоненіе. Очень легко понять устройство подобнаго инструмента, изображеннаго на рис. 163. Внутри вертикальной цилиндрической катушки подвѣшенъ тонкій цилиндрическій желѣзный стержень, прикрѣпленный къ нижнему концу спиральной пружины изъ тонкой проволоки. Упругая сила пружины является здѣсь направляющей силой, удерживающей желѣзный стержень на опредѣленной высотѣ. Если по катушкѣ проходитъ токъ, то стержень намагничивается и подъ дѣйствіемъ поля тока втягивается внизъ, при чемъ пружина слегка растягивается. Чѣмъ сильнѣе токъ, тѣмъ больше сила, тянущая стержень внизъ и тѣмъ

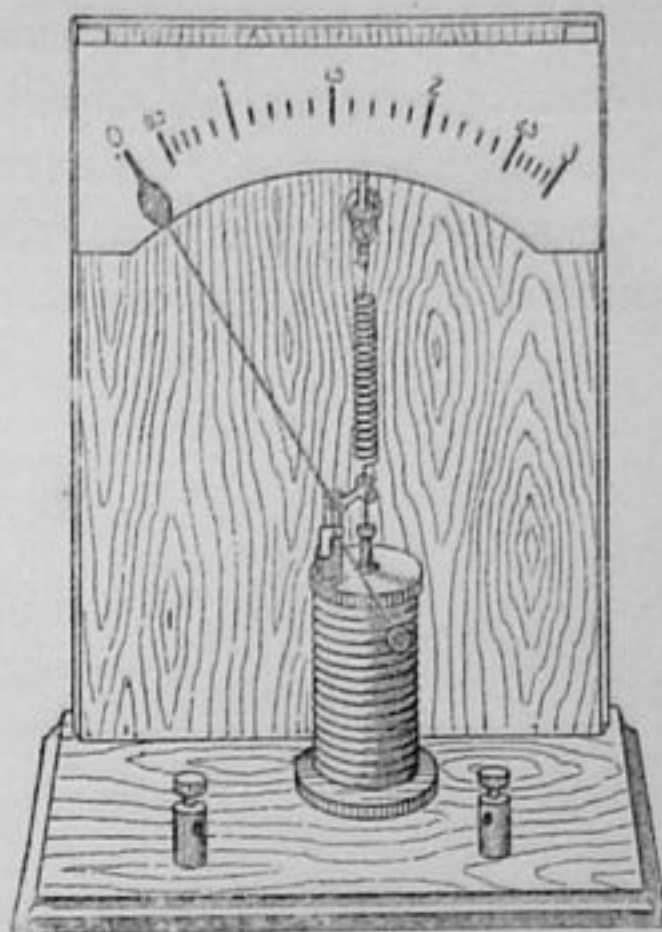


Рис. 163. Амперметръ съ мягкимъ желѣзомъ.

глубже входитъ онъ внутрь катушки. Помощью небольшого рычажнаго механизма движеніе стержня передается стрѣлкѣ, показывающей на шкалѣ силу тока. Инструменты съ мягкимъ желѣзомъ обладаютъ двумя характерными особенностями. Во-первыхъ, они всегда даютъ отклоненія въ одну и ту же сторону, такъ какъ при перемѣнѣ направленія тока желѣзо также перемагничивается. Во-вторыхъ, они чувствительнѣе при большихъ силахъ тока, нежели при малыхъ, такъ какъ при значительной силѣ тока мягкое желѣзо сильнѣе намагничивается. Это видно по шкалѣ изображеннаго на рис. 163 инструмента, на которой дѣленія, соотвѣтствующія слабымъ силамъ тока, расположены чаще, чѣмъ тѣ дѣленія, которыя соотвѣтствуютъ большимъ силамъ тока. На концѣ шкалы чувствительность инструмента опять уменьшается, такъ какъ съ погруженіемъ стержня внутрь катушки магнитная втягивающая сила уменьшается.

ГРАДУИРОВАНИЕ ИЗМѢРИТЕЛЕЙ ТОКА.

242. Выбравъ единицу электрическаго заряда—кулонъ (§ 100), мы тѣмъ самымъ предрѣшили, что мы должны принять за единицу силы электрическаго разряда вмѣстѣ съ сопровождающимъ его магнитнымъ полемъ, т.-е. мы опредѣлили единицу силы тока.

Сила такого электрическаго тока, при которомъ въ каждую секунду разряжается 1 кулонъ электричества, принимается за единицу силы тока и называется амперомъ.

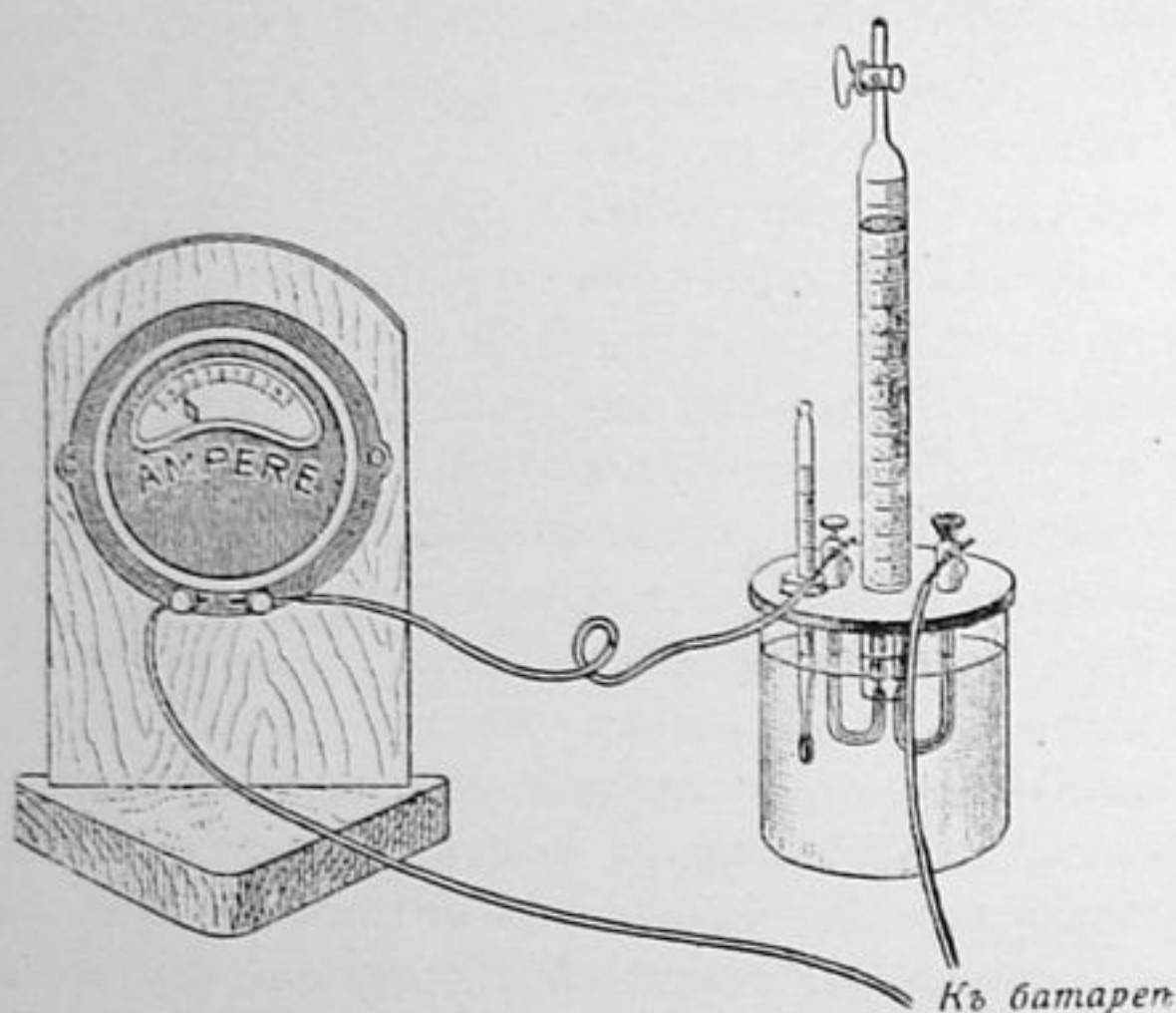


Рис. 164. Градуированіе амперметра.

Это опредѣленіе непосредственно даетъ и методъ градуированія амперметра. Составляютъ цѣпь, въ которую включаютъ послѣдовательно кулонметръ и амперметръ, и регулируютъ сопротивление такъ, чтобы токъ въ теченіе нѣкотораго промежутка времени оставался постояннымъ, т.-е. чтобы стрѣлка амперметра все это время стояла точно на одномъ и томъ же мѣстѣ. Это мѣсто отмѣчаютъ, измѣряютъ время, въ теченіе котораго проходилъ токъ, и наблюдаютъ, какое количество электричества m прошло въ теченіе этого промежутка времени t черезъ кулонметръ. Если время t выражено въ секундахъ и m —въ кулонахъ, то сила тока, соответствующая отмѣченному

положенію стрѣлки, равняется $J = \frac{m}{t}$ амперъ. Измѣняя сопроти-
 вленіе и тѣмъ измѣняя силу тока, можно такимъ образомъ програ-
 дуировать постепенно всю шкалу инструмента на амперы. Если тре-
 буется весьма точная градуировка, то нужно пользоваться серебря-
 нымъ кулонметромъ (§ 100); болѣе грубую градуировку удобнѣе
 всего производить при помощи кулонметра съ гремучимъ газомъ
 (рис. 164).

Если указаннымъ путемъ точно проградуировать шкалу одного
 какого-либо ампермет-
 ра, то этимъ инструмен-
 томъ можно пользоваться
 въ качествѣ нормаль-
 наго и при его помо-
 щи градуировать любой
 другой измѣритель силы
 тока. Съ этой цѣлью оба
 амперметра — градуиру-
 емый и нормальный —
 включаются въ одну и
 ту же цѣпь; пропуска-
 ется токъ и отмѣчает-
 ся отклоненіе, даваемое
 градуируемымъ инстру-
 ментомъ; нормальный
 амперметръ показыва-
 етъ силу тока, соответ-
 ствующую этому откло-
 ненію. Такимъ путемъ
 градуированіе произво-
 дится очень быстро.

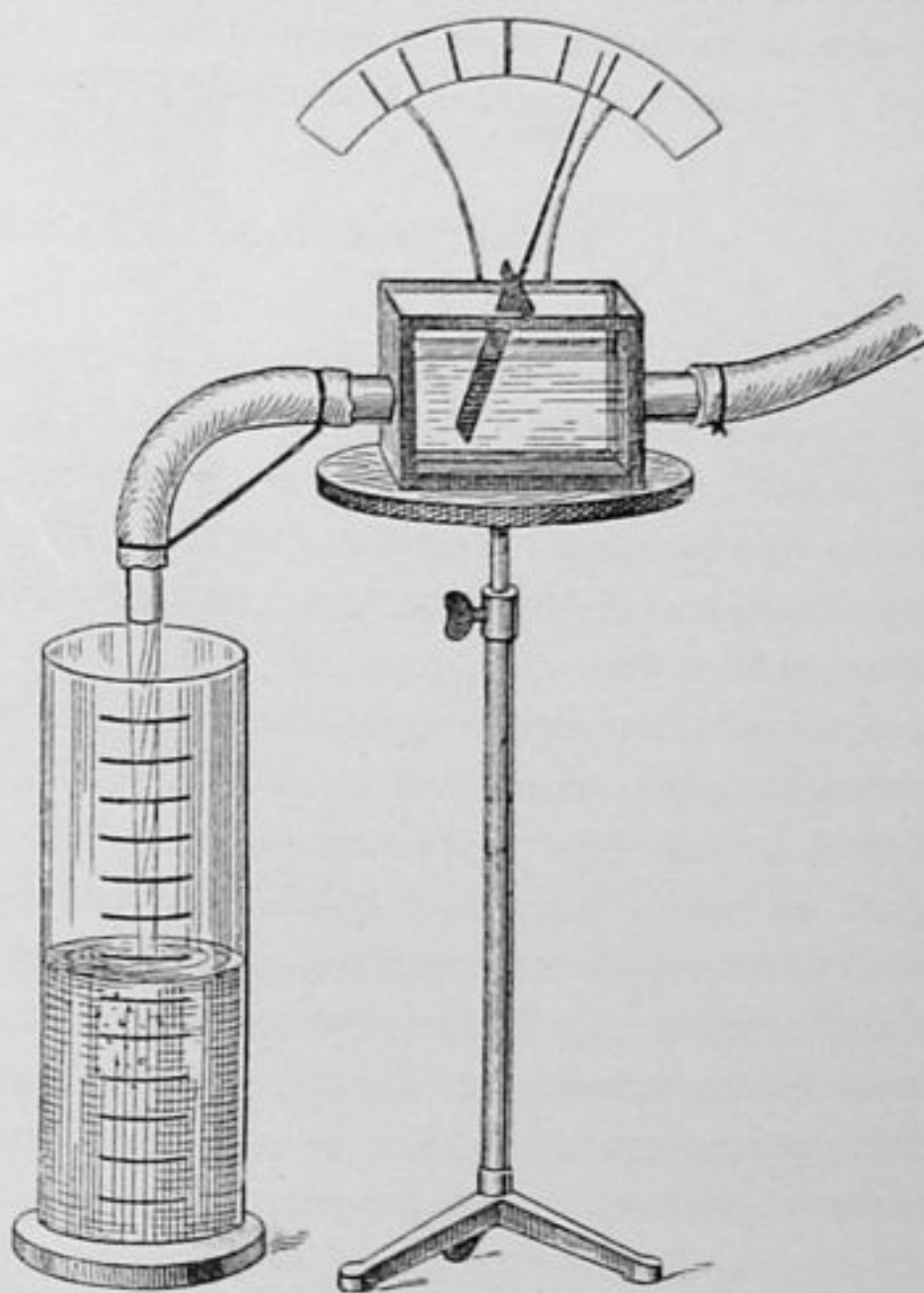


Рис. 165. Градуированіе гидродинамическаго
 измѣрителя скорости тока.

Градуированіе из-
 мѣрителя силы тока по-
 мощью кулонметра является одной изъ основъ всѣхъ измѣреній надъ
 магнитными полями. Оно вполне аналогично градуированію гидро-
 динамическаго измѣрителя скорости теченія жидкости. Простѣйшій
 измѣритель этой скорости представляетъ собою планку, подвѣшен-
 ную перпендикулярно къ направленію тока жидкости. Подъ давле-
 ніемъ текущей жидкости эта планка отклоняется отъ своего положенія

равновѣсія, и это отклоненіе тѣмъ значительнѣе, чѣмъ больше скорость теченія. Если установить такой измѣритель въ трубѣ, изъ которой жидкость вытекаетъ въ градуированный сосудъ (рис. 165) и измѣрить по часамъ въ секундахъ промежутокъ времени t , въ теченіе котораго вытекаетъ опредѣленный объемъ жидкости v , то получится величина силы тока $J = \frac{v}{t} \frac{\text{литръ}}{\text{сек.}}$. Такимъ путемъ можно градуировать шкалу для соединенной съ планкой стрѣлки, не зная законовъ гидравлическихъ силъ. Здѣсь измѣритель скорости теченія жидкости является вполне аналогичнымъ амперметру, а градуированный пріемникъ жидкости аналогиченъ кулонметру.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СОЛЕНОИДОВЪ.

243. Разсматривая расположеніе силовыхъ линій на рис. 157, мы видимъ, что внѣ соленоида поле бесконечно слабо по сравненію съ полемъ внутри соленоида. Въ этомъ можно еще нагляднѣе убѣдиться при помощи соленоида, снабженнаго особенно тонкой и равномерной обмоткой и настолько длиннаго, что его длину можно принять бесконечно большою по сравненію съ его толщиной. Если пропустить токъ черезъ такой соленоидъ, то по силовымъ дѣйствіямъ, испытываемымъ магнитной стрѣлкой, можно заключить, что вблизи обоихъ „полюсовъ“ соленоида образуются очень сильныя магнитныя поля; въ этихъ мѣстахъ сильное внутреннее магнитное поле выходитъ во внѣшнее пространство. Наоборотъ, около середины соленоида стрѣлка никакого поля не обнаруживаетъ, даже при приближеніи ея къ самымъ виткамъ. Витки, по которымъ проходитъ токъ, рѣзко отграничиваютъ сильное внутреннее поле отъ внѣшняго пространства, гдѣ интенсивность поля нужно принять равной нулю.

Внутри бесконечно длиннаго соленоида, по цилиндрической поверхности котораго проходитъ электрической токъ равномерной плотности, заключается сильное магнитное поле, рѣзко ограниченное этой поверхностью. Въ этой границы интенсивность поля равна нулю.

Вмѣсто „бесконечно длиннаго“ соленоида можно также взять „безграничный соленоидъ“, именно соленоидъ, имѣющій форму кольца.

Кольцеобразный, замкнутый соленоидъ съ постояннымъ поперечнымъ сѣченіемъ, по поверхности котораго течетъ равномерно плотный электрической токъ, не даетъ совершенно вѣшняго магнитнаго поля, тогда какъ во внутреннемъ кольцеобразномъ пространствѣ образуется сильное магнитное поле.

Этимъ свойствомъ обладаютъ не только соленоиды постоянного поперечнаго сѣченія. Въ двухъ соленоидахъ, имѣющихъ различныя по-

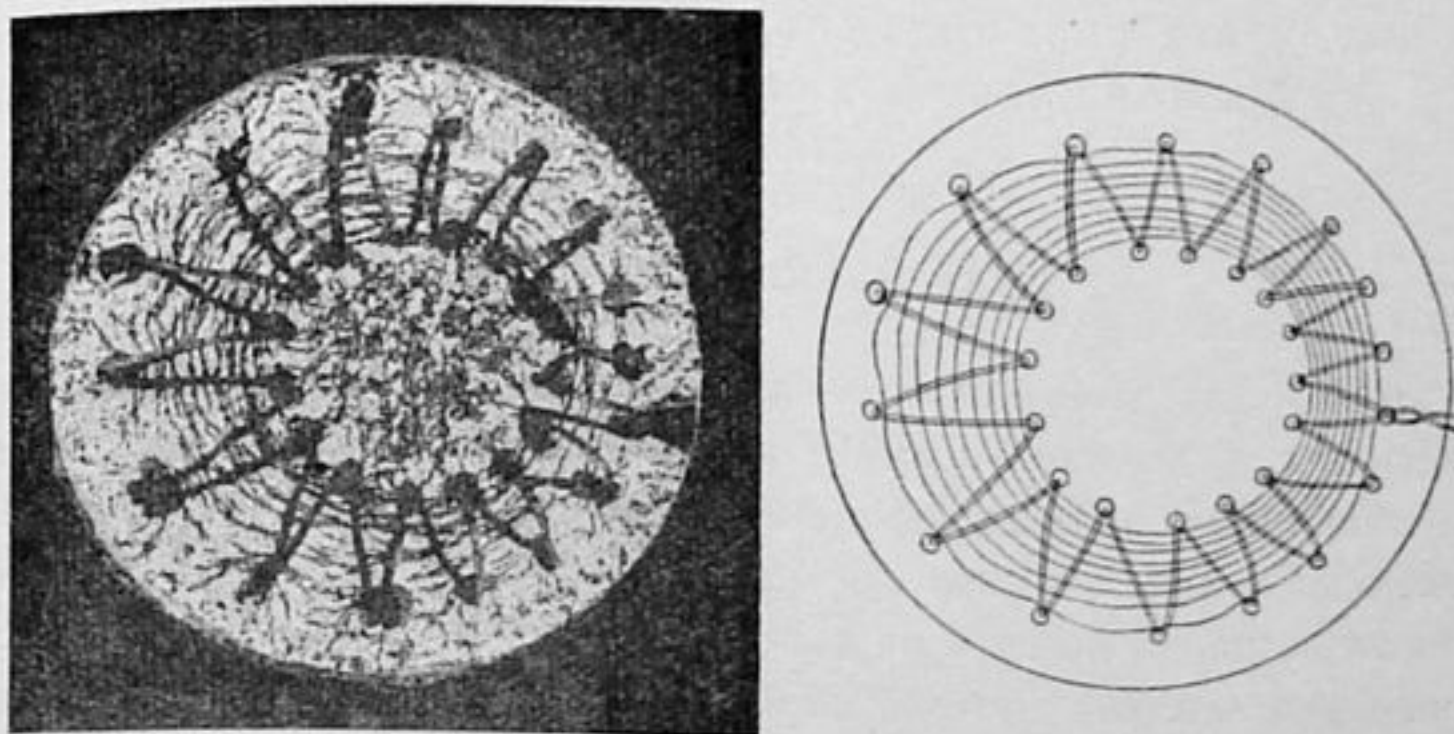


Рис. 166. Картина поля кольцеобразнаго соленоида.

перечныя сѣченія, можно всегда урегулировать силы токовъ такъ, чтобы оба соленоида имѣли полюсы одинаковой силы, т. е. чтобы эти полюсы какъ разъ компенсировали другъ друга, если приложить положительный полюсъ одного соленоида къ отрицательному полюсу другого. Для этого нужно плотность тока, идущаго по болѣе тонкому соленоиду, увеличить въ опредѣленномъ отношеніи сравнительно съ плотностью тока, идущаго по болѣе толстому соленоиду. Соленоидъ непостояннаго сѣченія можно представить себѣ состоящимъ изъ ряда маленькихъ соленоидовъ, сѣченія которыхъ различны. Если витки тока распределить по поверхности соленоида такимъ образомъ, чтобы полюсы каждыхъ двухъ соприкасающихся маленькихъ соленоидовъ взаимно компенсировались, то вѣшнее поле такого соленоида непостояннаго сѣченія также будетъ равно нулю. Чтобы этого достигнуть, нужно витки тока располагать въ болѣе узкихъ частяхъ

соленоида въ определенномъ отношеніи плотности, нежели въ широкихъ его частяхъ. Это ясно видно на рис. 166, представляющемъ картину поля кольцеобразнаго соленоида непостояннаго поперечнаго сѣченія. Такъ какъ обмотка на немъ сдѣлана правильно, то, дѣйствительно, все поле находится только въ кольцеобразной полости; снаружи опилки расположились совершенно беспорядочно.

Для кольцеобразнаго тѣла съ произвольнымъ переменнымъ сѣченіемъ можно всегда подобрать такую обмотку переменной плотности, чтобы при прохожденіи тока все магнитное поле тока сосредоточивалось во внутренней кольцеобразной полости, а сила внѣшняго поля была равна нулю.

СИЛА МАГНИТНАГО ПОЛЯ.

244. Сила поля внутри бесконечно длиннаго соленоида не зависитъ отъ величины сѣченія, но лишь отъ плотности тока, т.-е. отъ силы тока, приходящейся на каждый сантиметръ цилиндрической поверхности обмотки или же, какъ говорятъ, отъ числа амперъ-витковъ, приходящагося на сантиметръ. Въ этомъ можно убѣдиться экспериментальнымъ путемъ, но можно это вывести также и теоретически изъ вышеописанныхъ фактовъ. Представимъ себѣ два соленоида одинаковой длины съ одинаковымъ прямоугольнымъ сѣченіемъ и съ одинаковой плотностью тока на призматическихъ поверхностяхъ. Предположимъ, что эти соленоиды приложены одинъ къ другому равными боковыми гранями такъ, что сѣверный полюсъ одного расположенъ рядомъ съ сѣвернымъ полюсомъ другого и южный полюсъ — рядомъ съ южнымъ. При этомъ поля внутри соленоидовъ не измѣнятся, но получится вдвое большее призматическое полое пространство, раздѣленное посрединѣ поперечной стѣнкой, при чемъ въ каждой изъ обѣихъ половинъ будетъ поле одной и той же интенсивности. Въ поперечной стѣнкѣ получатся два тока, равные и взаимно противоположные. Слѣдовательно, результирующій токъ въ поперечной стѣнкѣ равенъ нулю, и можно его исключить изъ разсмотрѣнія, не измѣняя этимъ поля. Такимъ образомъ получается соленоидъ съ поперечнымъ сѣченіемъ двойныхъ размѣровъ, но съ тѣмъ же числомъ амперъ-витковъ, что и у каждаго изъ первоначально взятыхъ соленоидовъ. Поле въ призматической полости этого со-

леноида повсюду тождественно съ полемъ каждаго изъ соленоидовъ половиннаго поперечнаго сѣченія. Но можно пойти еще дальше; соленоидъ совершенно произвольнаго сѣченія можно мысленно разложить на совокупность произвольно большого числа одинаковыхъ между собою „элементарныхъ соленоидовъ“ съ прямоугольнымъ сѣченіемъ (рис. 167). Если каждый изъ этихъ элементарныхъ соленоидовъ окруженъ тѣмъ же числомъ амперъ-витковъ, что и большой соленоидъ, то во всѣхъ поперечныхъ стѣнкахъ токи взаимно уничтожаются. Поэтому эти стѣнки можно совершенно исключить изъ разсмотрѣнія, не измѣняя этимъ поля; отсюда слѣдуетъ, что по всему сѣченію большого соленоида поле постоянно, и именно равно въ точности полю элементарнаго соленоида съ тѣмъ же числомъ амперъ-витковъ.

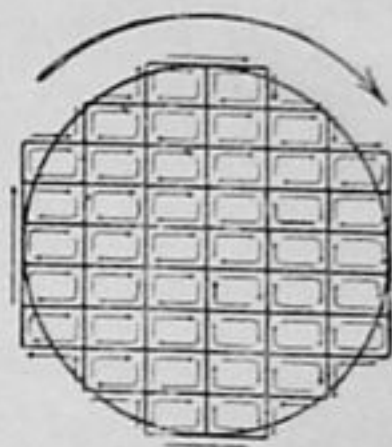


Рис. 167. Разложене соленоида съ большимъ поперечнымъ сѣченіемъ на элементарные соленоиды.

Пользуясь этимъ свойствомъ магнитнаго поля въ соленоидѣ, можно дать опредѣленіе силы магнитнаго поля. Дѣло въ томъ, что любую часть силовой трубки можно воспроизвести отдѣльно, независимо отъ остальнаго поля, при помощи безконечно тонкаго соленоида. И подобно тому, какъ въ § 242 мы приняли электрической токъ за мѣру полной величины его магнитнаго поля, такъ же и теперь мы примемъ его за мѣру „удѣльной силы“ или напряженія поля. Плотность тока или число амперъ-витковъ на сантиметръ изолированной силовой трубки является однозначной мѣрой ея силы; направленіе оси соленоида мы будемъ принимать за направленіе поля. Мы его будемъ считать положительнымъ въ томъ случаѣ, если, глядя по этому направленію, наблюдатель видитъ окружающую силовую трубку токъ текущимъ по направленію часовой стрѣлки. Это направленіе совпадаетъ съ выше указаннымъ направленіемъ силы, дѣйствующей на положительный магнитный полюсъ въ полѣ.

Сила магнитнаго поля въ произвольномъ мѣстѣ измѣняется числомъ амперъ-витковъ, приходящимся на сантиметръ, у соленоида, поле котораго тождественно съ полемъ въ изслѣдуемомъ мѣстѣ. Если оба сравниваемые поля одинаково ориентированы въ пространствѣ, то положительное направленіе оси соленоида опредѣляетъ направленіе поля. Тождественность обоихъ полей можно констатировать по

ихъ силовому дѣйствию на магнитный полюсъ или же помощью какого-либо иного магнитоскопа.

За единицу силы магнитнаго поля мы примемъ силу такого поля, въ которомъ число амперъ-витковъ, приходящееся на длину одного сантиметра, равно единицѣ.

Ниже мы увидимъ, какимъ образомъ практически производятся измѣренія поля на основаніи этого опредѣленія. Измѣряемую въ этихъ единицахъ силу поля мы будемъ всегда обозначать буквою H .

Согласно опредѣленію, сила магнитнаго поля H представляетъ собою роторъ.

СЛОЖЕНІЕ МАГНИТНЫХЪ ПОЛЕЙ.

245. Если въ магнитное поле силы H_1 внести параллельно направленію его силовыхъ линий соленоидъ, по обмоткѣ котораго течетъ токъ, при чемъ на 1 сантиметръ приходится H_2 амперъ-витковъ, то сила поля внутри соленоида въ общей сложности составляетъ $H_1 + H_2$ амперъ-витковъ на сантиметръ. Въ этомъ можно убѣдиться экспериментально, но это слѣдуетъ уже а priori изъ даннаго выше опредѣленія силы поля. Такъ какъ соединенное дѣйствіе полей

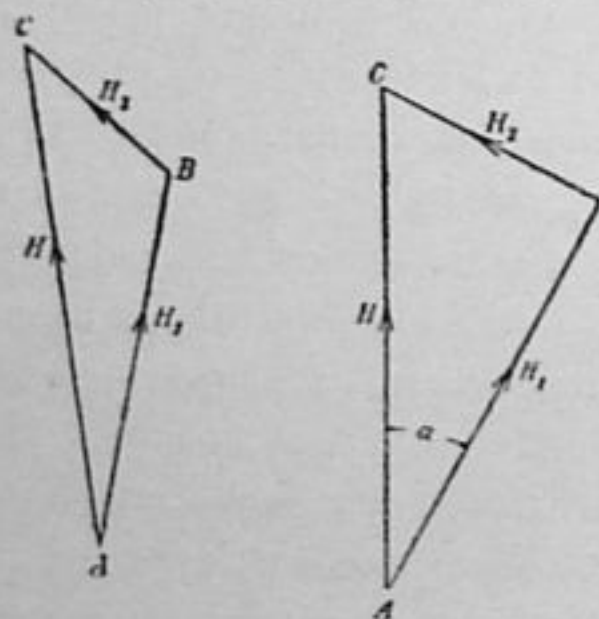


Рис. 168. Сумма двухъ векторовъ.

H_1 и H_2 имѣетъ мѣсто лишь внутри соленоида, то поле, находящееся внѣ пространства, ограниченнаго витками соленоида, не оказываетъ никакого вліянія на результатъ ихъ наложенія. Поэтому мы можемъ принять, что и поле H_1 , подобно полю H_2 , расположено лишь внутри соленоида. Это предположеніе соответствуетъ тому случаю, когда поле H_1 вызывается второй обмоткой того же соленоида, по которой проходитъ токъ, имѣющій плотность H_1 амперовъ на сантиметръ. Въ общемъ плотность тока на соленоидѣ при этомъ равняется $H_1 + H_2$, откуда ясно, что H_1 и H_2 вмѣстѣ эквивалентны полю съ числомъ амперъ-витковъ, равнымъ $H_1 + H_2$. Если H_1 и H_2 направлены прямо противоположно, то, конечно, получается величина $H_1 - H_2$. Въ общемъ случаѣ, когда H_1 и H_2 имѣютъ произвольныя направленія, сложение производится по правилу сложения векторовъ. Пользуясь этимъ правиломъ, легко найти

сумму двух векторов H_1 и H_2 , если их представить графически отрезками прямых, направления которых совпадают с направлениями векторов и длины которых пропорциональны величинам векторов. Если начало вектора H_2 , представленного отрезком BC (рис. 168), совместить с концом отрезка AB , представляющего вектор H_1 , то отрезок AC от начала первого вектора до конца второго представить собою по величине и по направлению вектор, равный сумме $\overline{H_1 + H_2}$. Что два магнитных поля H_1 и H_2 , измеренные их числами амперь-витковъ, всегда слагаются по этому правилу, можно убедиться такимъ же образомъ, какъ для только-что рассмотрѣннаго частнаго случая параллельнаго расположенія. Конечно, это положеніе легко проверить также и экспериментально.

Два магнитных поля, числа амперь-витковъ которыхъ извѣстны и равняются H_1 и H_2 , образуютъ при любомъ косомъ наложеніи поле, число амперь-витковъ котораго равняется векторіальной суммѣ $\overline{H_1 + H_2}$.

На этомъ предложеніи можно основать удобный методъ измѣренія поля. Внесемъ въ неизвѣстное магнитное поле очень длинную и очень тонкую катушку и пропустимъ черезъ нее электрической токъ такой силы, чтобы слагающая силы поля въ направленіи оси катушки стала равной нулю. Если катушка параллельна измѣряемому полю, то поле будетъ при этомъ равно нулю, если же она наклонена къ направленію измѣряемаго поля, то останется еще поле, перпендикулярное къ оси катушки. Это можно распознать при помощи небольшого желѣзнаго стержня, который вводятъ внутрь катушки. Въ зависимости отъ того, какой изъ двухъ случаевъ имѣетъ мѣсто, стержень либо устанавливается перпендикулярно къ оси катушки, либо вовсе не принимаетъ опредѣленнаго направленія. Плотность тока въ обмоткѣ соленоида равна слагающей магнитнаго поля въ направленіи оси соленоида, а въ частномъ случаѣ, когда поле и соленоидъ одинаково направлены, она равна самому измѣряемому магнитному полю, но имѣетъ противоположный знакъ.

Такой методъ измѣренія магнитнаго поля можно примѣнять также и къ внутреннимъ частямъ твердыхъ тѣлъ; для этого нужно лишь сдѣлать въ тѣлѣ длинные тонкіе каналы, въ которые можно было бы ввести соленоидъ. Вообще же, какъ и при электрическихъ измѣреніяхъ, довольствуются опредѣленіемъ полной величины числа амперь-витковъ поля и вычисленіемъ распредѣленія поля въ пространствѣ.

Другой весьма удобный методъ измѣренія магнитнаго поля быть уже упомянутъ нами выше (§ 232): на неизвѣстное поле H_1 мы налагаемъ перпендикулярное къ нему поле H_2 , число амперъ-витковъ котораго извѣстно, и измѣряемъ уголъ α , на который при такомъ наложеніи поворачиваются силовыя линіи относительно своего первоначальнаго положенія. Тогда $H_1 = H_2 \cot \alpha$, какъ это непосредственно слѣдуетъ изъ рис. 168. Поле H_2 можно получить помощью соленоида съ достаточно большимъ сѣченіемъ, позволяющимъ ввести внутрь соленоида буссоль для измѣренія угла α . Если извѣстны длина соленоида L и число витковъ N , то для опредѣленія H_2 остается только измѣрить помощью градуированнаго амперметра силу тока J . Именно,

$$H_2 = \frac{N}{L} \cdot J \frac{\text{а.-в.}}{\text{см.}}$$

Съ болѣе удобнымъ инструментомъ мы познакомимся въ слѣдующемъ параграфѣ.

СИЛА МАГНИТНАГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ.

246. На основаніи всего вышесказаннаго мы можемъ теперь разрѣшить поставленную въ § 232 задачу полученія поля опредѣленной величины для сравнительнаго измѣренія поля земли. Для большаго удобства съ этой цѣлью пользуются не длинной катушкой, какъ это было сказано выше, но просто проводочнымъ кругомъ (рис. 169). Теоретическія и экспериментальныя изслѣдованія поля, образующагося около круговаго проводника съ токомъ, установили съ достовѣрностью, что въ центрѣ круговаго проводника радіуса R , при силѣ тока J , сила магнитнаго поля тока H' (расположеннаго перпендикулярно къ плоскости круга) выражается слѣдующею простою формулою:

$$H' = \frac{J}{2R} \frac{\text{а.-в.}}{\text{см.}}$$

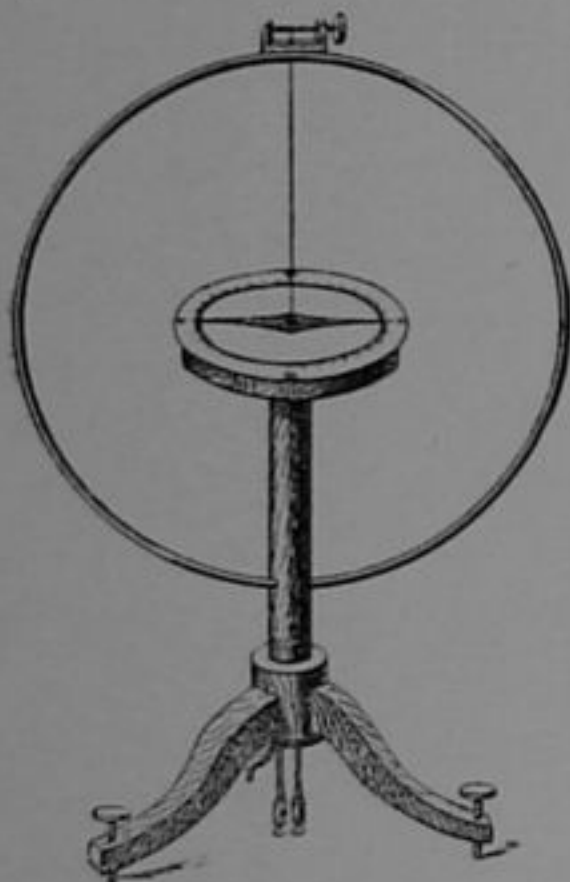


Рис. 169. Тангенсъ-гальванометръ.

Если установить проволочный кругъ такъ, чтобы его плоскость была параллельна магнитному меридіану, т.-е. чтобы при отсутствіи тока магнитная стрѣлка помѣщенной въ центрѣ круга буссоли устанавливалась въ плоскости круга, то по отклоненію стрѣлки α , соотвѣтствующему силѣ тока J , можно опредѣлить горизонтальную составляющую земнаго поля. Она равняется

$$H_h = \frac{H'}{\operatorname{tg} \alpha} = H' \operatorname{ctg} \alpha.$$

Такъ какъ $\operatorname{tg} \alpha$ пропорціоналенъ H' и, слѣдовательно, также J , то этотъ инструментъ (часто употреблявшійся прежде въ качествѣ гальванометра, для чего онъ, однако, мало пригоденъ) называется тангенсъ-гальванометромъ.

При измѣреніи помощью тангенсъ-гальванометра горизонтальной составляющей земнаго поля въ различныхъ мѣстностяхъ Германіи были получены числа отъ 0,139 до 0,164. Въ Грейфсвальдѣ, напримѣръ, $H_h = 0,146 \frac{\text{а.-в.}}{\text{с.м.}}$. При этомъ, конечно, предполагается, что измѣренія были произведены въ такихъ пунктахъ, гдѣ земное поле не возмущается вліяніемъ большихъ массъ желѣза. Какъ показываетъ положеніе, принимаемое стрѣлкой наклоненія, кромѣ горизонтальной составляющей, существуетъ еще вертикальная составляющая H_v земнаго поля. Если уголъ наклоненія равенъ φ , то, по закону сложения магнитныхъ полей, $H_v = H_h \operatorname{tg} \varphi$, а самая сила поля H , дѣйствующая въ направленіи стрѣлки наклоненія, равна $H = \frac{H_h}{\cos \varphi}$. Такъ какъ въ Грейфсвальдѣ (§ 231) $\varphi = 67,7^\circ$, то здѣсь для невозмущеннаго поля земли $H_v = 0,356$, $H = 0,385 \frac{\text{а.-в.}}{\text{с.м.}}$.

247. Какъ выше уже было указано (§ 233), магнитное поле земли подвержено правильнымъ суточнымъ колебаніямъ, величины которыхъ налагаются на нѣкоторую, въ достаточной степени постоянную, среднюю величину. Это переменное магнитное поле съ періодомъ въ однѣ сутки представляетъ собою, какъ впервые показалъ Фарадэй, поле четырехъ большихъ круговыхъ атмосферныхъ токовъ, изъ которыхъ два приходятся на сѣверное полушаріе и два на южное; каждый изъ нихъ, такимъ образомъ, покрываетъ приблизительно четверть земной поверхности. Эти токи циркулируютъ въ атмосферѣ параллельно земной поверхности, такъ что твердая земля не является проводникомъ этихъ токовъ. Центрами этихъ круговыхъ токовъ являются четыре точки, находящіяся въ одной плоскости,

т.-е. расположенныя подъ двумя меридіанами, различающимися на 180° , и притомъ такъ, что каждая изъ этихъ точекъ удалена отъ ближайшаго географическаго полюса приблизительно на 45° . Эти центры вмѣстѣ съ круговыми токами движутся вслѣдъ за солнцемъ, совершая полный оборотъ вокругъ земной оси въ 24 часа, чѣмъ и вызываютъ періодическія колебанія земнаго поля. Несомнѣнно, что эти атмосферные токи находятся въ нѣкоторой связи съ прохожденіемъ солнечныхъ лучей черезъ атмосферу. Быть можетъ, они связаны съ іонизаціей воздуха ультрафіолетовыми лучами; во всякомъ случаѣ, ничего болѣе опредѣленнаго относительно причинъ ихъ возникновенія сказать нельзя.

Также и сильныя магнитныя возмущенія („магнитныя бури“), которыми всегда сопровождаются сѣверныя сіянія, объясняются дѣйствіемъ магнитныхъ полей атмосферныхъ электрическихъ токовъ. Сѣверныя сіянія представляютъ собою не что иное, какъ непрерывныя тлѣющіе электрическіе разряды въ верхнихъ слояхъ атмосферы; поле этихъ (конечно, непостоянныхъ) тлѣющихъ токовъ и наблюдается при „магнитныхъ буряхъ“.

Наоборотъ, постоянная или, вѣрнѣе, подверженная медленнымъ (вѣковымъ) измѣненіямъ главная часть магнитнаго поля земли связана съ твердою землею. Вопросъ о томъ, въ какой мѣрѣ эта главная часть должна считаться полемъ циркулирующихъ въ земной корѣ электрическихъ токовъ (земныхъ токовъ) и въ какой мѣрѣ полемъ постояннаго магнитнаго ядра, находящагося, можетъ быть, внутри земли, остается до сихъ поръ открытымъ.

ПЕРВЫЙ ОСНОВНОЙ ЗАКОНЪ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ МАКСВЕЛЛА.

248. Поле, окружающее проводникъ съ токомъ J , можно представить себѣ разложеннымъ на кольцевыя силовыя трубки. Каждую такую трубку можно, согласно § 244, разсматривать въ отдѣльности, какъ кольцеобразный соленоидъ. Изъ такихъ соленоидовъ можно построить поле, вполне тождественное съ полемъ тока, но состоящее изъ отдѣльныхъ, физически не связанныхъ между собою силовыхъ трубокъ. Такимъ путемъ искусственно построенная область оказывается раздѣленной многочисленными поперечными стѣнками, составленными изъ частей поверхностей окружающихъ каждую пару смежныхъ соленоидовъ. Только внутренняя граница внутренняго кольца не представляетъ собою двойной стѣнки, если пространство,

занимаемое проводникомъ тока, считать пустымъ. Ядромъ пространства, заполненнаго клѣтками, является въ такомъ случаѣ нитеобразная полость f (рис. 170), имѣющая форму проводника тока и состоящая только изъ одиночныхъ частей поверхностей, окружающихъ соленоиды. Если поле тока дѣйствительно тождественно съ такъ построеннымъ искусственнымъ полемъ, то въ области, заполненной клѣт-

Рис. 170b

Рис. 170a

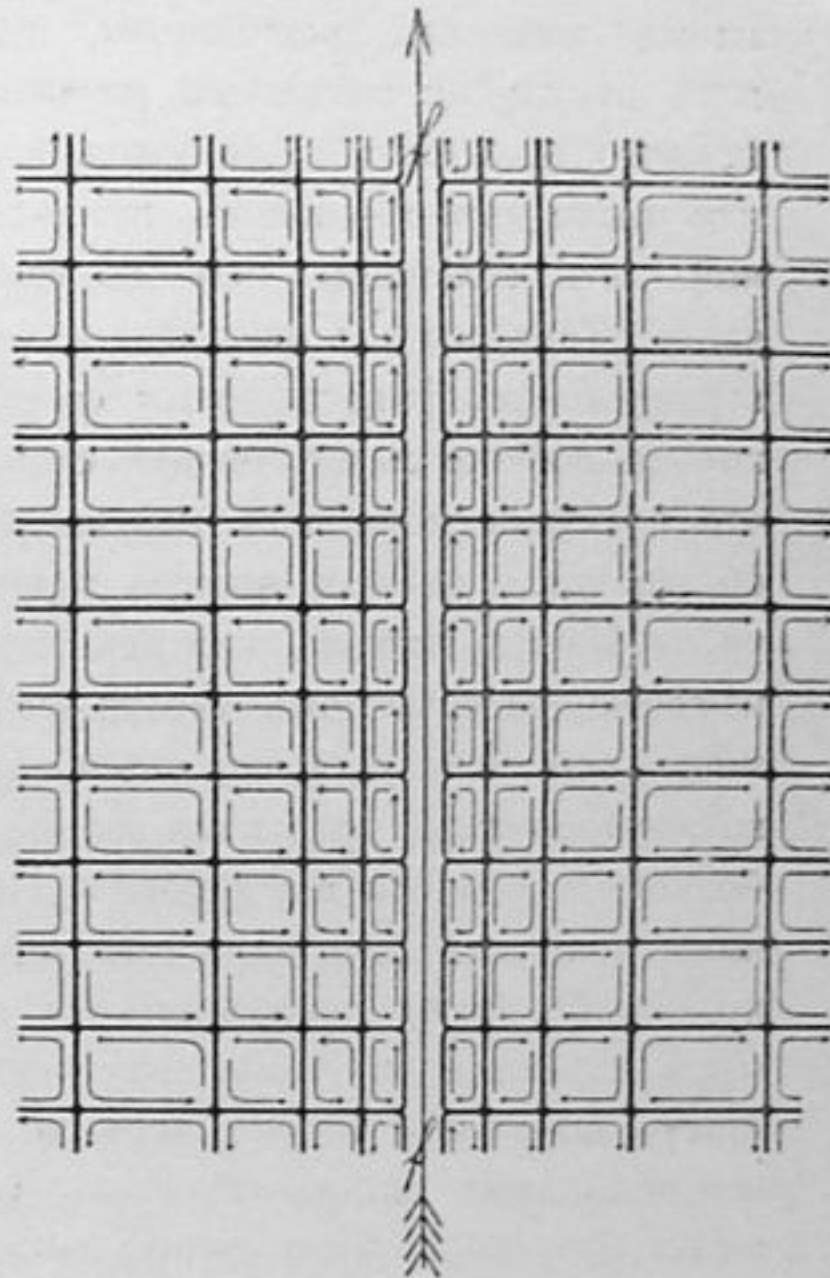
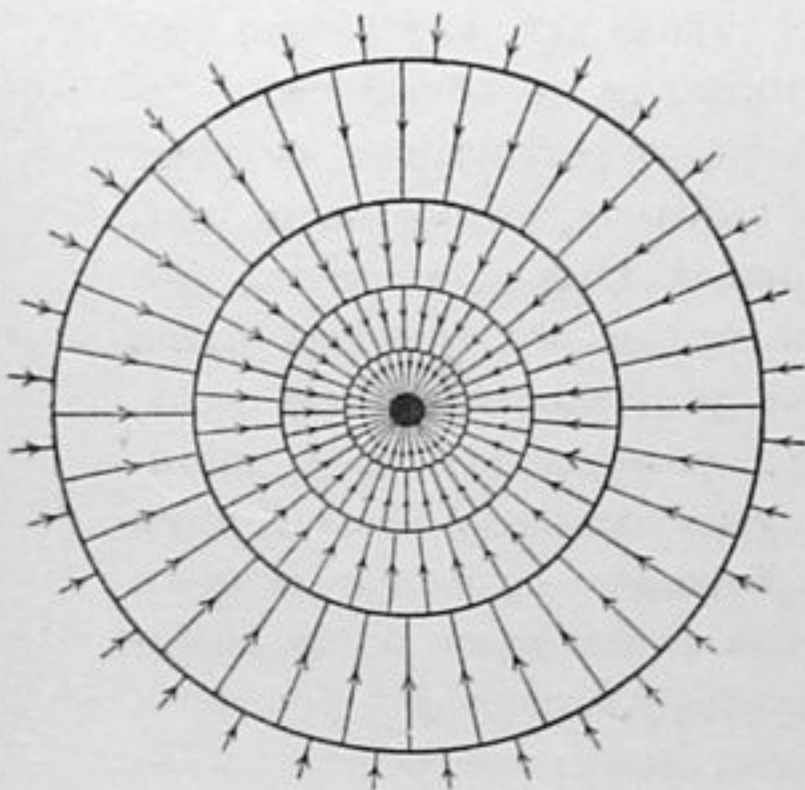


Рис. 170. Разложеніе поля тока на отдѣльныя силовыя трубки.

а) Сѣченіе параллельно силовымъ линіямъ.

б) Сѣченіе перпендикулярно къ силовымъ линіямъ, f — нить тока.

ками, вообще долженъ происходить такой же переносъ электричества, какъ и въ токѣ, такъ какъ магнитное поле и переносъ электрическихъ зарядовъ, согласно § 239, представляютъ собою двѣ стороны одного и того же явления. Отсюда слѣдуетъ, что, во-первыхъ, въ двойныхъ стѣнкахъ искусственной области, заполненной клѣтками, повсюду токъ долженъ быть въ результатъ равенъ нулю, т.-е. токи обѣихъ соприкасающихся обмотокъ соленоид-

довъ должны быть всегда взаимно противоположны и равны и, во вторыхъ, въ нитеобразной полости f , которую окружаютъ внутренняя трубка, токъ долженъ быть равенъ J , т.-е. долженъ быть такимъ же, какъ и токъ въ проводникѣ, окруженномъ полемъ тока.

Разсмотримъ теперь кольцевые соленоиды въ отдѣльности. Токъ, окружающій соленоидъ, съ наружной стороны кольца имѣетъ точно такую же силу, что и съ внутренней стороны. Длина же соленоида оказывается различной съ внутренней стороны и съ наружной: вслѣдствіе различія въ кривизнѣ наружная длина немного превосходитъ внутреннюю. Въ силу этого плотность тока или число амперъ-витковъ, приходящееся на сантиметръ, для наружной части соленоида немного меньше, чѣмъ для внутренней его части. Такъ какъ токи взаимно уничтожаются въ общей части поверхностей соприкасающихся соленоидовъ, то слѣдующее внѣшнее кольцо должно съ внутренней стороны имѣть ту же плотность тока, что и первое кольцо съ наружной стороны. Отсюда слѣдуетъ, что общее число амперъ-витковъ внѣшняго кольца въ точности равно числу амперъ-витковъ внутренняго кольца. Напротивъ, сила поля, измѣряющаяся числомъ амперъ-витковъ, приходящимся на 1 сантиметръ оси соленоида, во внѣшнемъ кольцѣ нѣсколько меньше, чѣмъ во внутреннемъ, такъ какъ длина оси внѣшняго соленоида немного больше длины оси внутренняго. По мѣрѣ перехода къ болѣе внѣшнимъ кольцамъ плотность тока или сила поля въ кольцахъ убываетъ, но полное число амперъ-витковъ остается всегда постояннымъ. По мѣрѣ перехода къ болѣе внутреннимъ кольцамъ сила поля возрастаетъ, но полное число амперъ-витковъ остается неизмѣннымъ. Когда мы подойдемъ такимъ образомъ къ нитеобразной полости f , то окажется, что постоянная полная величина силы поля въ кольцахъ представляетъ собою не что иное, какъ полную величину силы тока въ нити f или, иначе говоря, силу тока J .

Полная величина силы магнитнаго поля на силовой линіи, окружающей проводникъ съ токомъ, выраженная полнымъ числомъ амперъ-витковъ мысленно изолированной силовой трубки, на всѣхъ разстояніяхъ отъ проводника одинакова и равна току, проходящему по проводнику.

Если вдоль отрѣзка силовой линіи длины l сила поля, вычисленная въ амперъ-виткахъ на сантиметръ, равняется H , то число всѣхъ амперъ-витковъ на отрѣзкѣ l равняется Hl . Если вдоль боль-

шого отръзка силовой линіи сила поля непрерывно измѣняется и на маленькихъ отръзкахъ l_1, l_2, l_3, \dots , дающихъ въ общей сложности длину l , имѣеть соответственно значенія H_1, H_2, H_3, \dots , то число всѣхъ амперъ-витковъ U вдоль отръзка l равняется линейной суммѣ силъ H :

$$U = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \dots$$

Если отръзокъ l имѣеть направленіе, не совпадающее съ направлениемъ H , то для вычисленія U нужно принять во вниманіе слагающія H въ направленіяхъ малыхъ отръзковъ l_1, l_2, l_3, \dots . Если углы между H_1, H_2, H_3, \dots и отръзками l_1, l_2, l_3, \dots равняются $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots$, то

$$U = H_1 l_1 \cos \varphi_1 + H_2 l_2 \cos \varphi_2 + H_3 l_3 \cos \varphi_3 + \dots$$

Полная величина силы магнитнаго поля вдоль опредѣленнаго отръзка вычисляется, слѣдовательно, въ видѣ линейной суммы, совершенно такъ же, какъ и полная величина силы электрическаго поля (§ 24). Только-что формулированное основное положеніе можетъ быть высказано еще такъ:

Вычисленная въ амперъ-виткахъ линейная сумма магнитнаго поля тока, взятая вдоль опредѣленной замкнутой линіи, одинъ разъ обвивающей проводникъ съ токомъ, всегда равняется силѣ электрическаго тока, вычисленной въ амперахъ.

Линейная сумма поля вдоль замкнутой кривой, окружающей пространство, черезъ которое токъ вовсе не проходитъ, равняется нулю.

Слѣдовательно, линейная сумма поля вдоль замкнутой кривой всегда указываетъ намъ, проходятъ ли черезъ ограничиваемую этой кривой поверхность электрическіе заряды, и какой они силы. Здѣсь мы имѣемъ причинную связь между магнитнымъ полемъ и переносомъ электрическихъ зарядовъ, установленную въ формѣ простого закона.

249. Особенно простымъ оказывается распределеніе силовыхъ линій въ случаѣ прямолинейнаго проводника. Въ этомъ случаѣ силовыя линіи представляютъ собою окружности, центры которыхъ лежатъ на оси съ токомъ. Во всѣхъ точкахъ, отстоящихъ на одинаковомъ разстояніи r отъ оси проводника съ токомъ, сила поля H одинакова; это вытекаетъ уже изъ симметріи поля. Слѣдовательно, линейная сумма силы поля вдоль окружности радіуса r равняется

просто $2\pi rH$ амперъ-виткамъ. Если сила тока въ прямолинейномъ проводникѣ равняется J амперамъ, то

$$2\pi rH = J$$

и, слѣдовательно,

$$H = \frac{J \text{ а.-в.}}{2\pi r \text{ см.}}$$

Сила магнитнаго поля, окружающаго прямолинейный проводникъ съ токомъ, обратно пропорціональна разстоянію отъ проводника.

Въ этомъ простомъ случаѣ совершенно ясно выступаетъ свойство поля тока, которое выражается закономъ, изложеннымъ въ § 248. Но и въ болѣе сложныхъ случаяхъ (напримѣръ, въ случаѣ круговаго проводника съ токомъ) вычисленіе силы поля основывается на этомъ же законѣ, при чемъ пользуются тѣмъ (установленнымъ ниже) фактомъ, что магнитныя силовыя линіи не могутъ заканчиваться или начинаться въ свободномъ эфирѣ.

250. Болѣе глубокое значеніе установленнаго въ § 248 основнаго закона магнитнаго поля тока было впервые выяснено Максвелломъ. Какъ мы видѣли, электрической токъ представляетъ собою постоянное возстановленіе электрическаго поля, непрерывно стремящагося исчезнуть въ проводникѣ вслѣдствіе переноса іоновъ. Какъ было уже указано въ § 239, магнитное поле слѣдуетъ разсматривать, какъ процессъ въ эфирѣ, непрерывно возстаивающій напряженіе въ проводникѣ. Если мы представимъ себѣ магнитное поле въ родѣ поля тока, но не съ проводникомъ, а съ изоляторомъ въ центрѣ, то такое поле должно было бы быть непрерывно возрастающимъ электрическимъ полемъ, такъ какъ въ этомъ случаѣ дѣйствіе магнитнаго процесса уже не компенсируется разрывами напряженій. Поэтому мы должны въ магнитномъ полѣ видѣть прежде всего эфирные процессы, которые порождаютъ и измѣняютъ электрическія напряженія.

Роль магнитнаго поля въ физикѣ эфира, такимъ образомъ, совершенно аналогична роли движеній въ механикѣ вѣсомыхъ тѣлъ. Напряженіе въ упругомъ тѣлѣ никакъ не можетъ возникнуть или измѣниться, если не вызваны растяженіе, сжатіе, изгибъ или закручиваніе тѣла опредѣленными движеніями, которыя бывають иногда весьма малы, но никогда не могутъ вполне отсутствовать. Если тѣло пластично, какъ, напримѣръ, свинцовая проволока или вязкая жидкость, то напряженіе, соотвѣтствующее опредѣленной деформаци, самопроизвольно

уменьшается вслѣдствіе внутреннихъ перемѣщеній молекулъ подобно тому, какъ въ электрическомъ проводникѣ само по себѣ разрывается электрическое напряженіе. Въ такомъ случаѣ можетъ возникнуть непрерывное движеніе, длительная деформація, „теченіе“ тѣла безъ того, чтобы упругое напряженіе повышалось. Кромѣ того, встрѣчаются также стаціонарныя движенія, длящаяся продолжительное время и не вызывающія вообще деформацій. Примѣромъ являются движенія въ системѣ зубчатыхъ колесъ, которыя равномерно вращаются, при чемъ не возникаютъ возрастающія внутреннія напряженія.

Въ физикѣ эѳира стаціонарнымъ движеніямъ аналогичны стаціонарныя магнитныя поля, имѣющія длительное существованіе и не возбуждающія опредѣленныхъ электрическихъ полей. При какомъ именно условіи магнитное поле стаціонарно, мы уже выяснили въ § 249. Это условіе заключается въ слѣдующемъ: полная величина силы поля для замкнутой кривой должна равняться нулю. Примѣромъ является магнитное поле внѣ проводника, по которому течетъ постоянный электрической токъ; полная величина силы этого поля вдоль кривыхъ, не обвивающихъ проводника, всегда равняется нулю. И, дѣйствительно, въ этомъ случаѣ въ окружающемъ проводникъ изоляторѣ поле не вызываетъ никакихъ возрастающихъ напряженій. Наоборотъ, внутри проводника поле не удовлетворяетъ указанному условію, и потому здѣсь происходитъ постоянное образованіе электрическихъ напряженій, которыя тотчасъ же вновь исчезаютъ. Прекрасную механическую аналогію магнитнаго поля тока представляетъ зубчатая система часового механизма, который вращаетъ мѣшалку, находящуюся въ какой-либо жидкости. Источникъ силы — гиря или пружина часового механизма — соотвѣтствуетъ гальванической цѣли или батарее. Движущіеся колеса и валы, передающіе силовыя дѣйствія на разстояніе, при чемъ движенія не возбуждаютъ въ нихъ самихъ непрерывно возрастающихъ напряженій, соотвѣтствуютъ внѣшнему магнитному полю. Движущаяся мѣшалка, которая вызывала бы въ размѣшиваемой жидкости напряженія, если бы они постоянно не разрушались вслѣдствіе скольженія частицъ жидкости, и которая, въ силу этого непрерывнаго уничтоженія напряженій, характеризуемаго словомъ „треніе“, непрерывно поглощаетъ энергію, соотвѣтствуетъ проводнику съ токомъ, къ которому точно такъ же непрерывно подводится внѣшнимъ полемъ энергія, превращающаяся въ немъ въ теплоту.

іонная теорія приводить насъ къ слѣдующему выраженію закона Максвелла, болѣе общему, нежели всѣ предыдущія, такъ какъ оно охватываетъ также и конвекціонные токи, съ которыми мы встрѣчаемся въ опытѣ Ролэнда и еще часто будемъ встрѣчаться:

Линейная сумма магнитнаго поля вдоль замкнутой кривой равняется всему электрическому току, который проходитъ черезъ ограниченную кривой часть поверхности, и въ общемъ случаѣ состоитъ изъ тока конвекціоннаго и тока смѣщенія.

МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЭИРА.

252. Простая модель, описанная въ §§ 23 и 58, не даетъ намъ никакого представленія о магнитныхъ явленіяхъ и объ особенностяхъ возникновенія электрическихъ напряженій; она, слѣдовательно, весьма неполно иллюстрируетъ физическія свойства ээира. Однако, мы можемъ значительно улучшить эту модель небольшимъ измѣненіемъ. Если электрической токъ мы въ модели представляемъ поступательнымъ движеніемъ, то магнитная силовая линія, которую мы характеризуемъ и измѣряемъ, какъ нѣкоторый окруженный токомъ соленоидъ, должна, несомнѣнно, быть представляема вращательнымъ движеніемъ. Но такія вращательныя движенія невозможны, если упругія клѣтки, изъ которыхъ мы строимъ нашу модель, всѣ прочно соединены между собою. Поэтому мы будемъ представлять себѣ, что каждая упругая клѣтка соединяется съ сосѣдной при посредствѣ шариковъ, которые могутъ кататься по границѣ клѣтокъ, составляя все-таки достаточно прочное соединеніе между ними; эти шарики, слѣдовательно, не могутъ соскальзывать или отрываться отъ клѣточной стѣнки. Для удобства мы будемъ принимать эти соединительные шарики за твердые. Такъ какъ студнеобразный ээиръ не сжимаемъ, какъ мы это видѣли въ § 58, то мы должны предположить, что какимъ-либо способомъ разстояніе между центрами твердыхъ шариковъ поддерживается постояннымъ, на примѣръ, при помощи особой твердой сѣтки, находящейся между клѣтками и не препятствующей ихъ деформациямъ. Эта твердая сѣтка должна удерживать шарики такимъ образомъ, чтобы они могли свободно вращаться вокругъ любой оси, какъ, на примѣръ, шарики въ шаровыхъ сочлененіяхъ. Усложненный такимъ образомъ студнеобразный ээиръ становится похожимъ на весьма сложную систему зубчатыхъ колесъ, съ движеніями которой мы уже сравнивали выше явленіе магнит-

наго поля. Когда твердые шарики вращаются въ опредѣленномъ направленіи, а упругія клѣтки — въ противоположномъ, можетъ имѣть мѣсто стационарное вращательное движеніе, не вызывающее въ упругихъ клѣткахъ никакихъ деформаций, связанныхъ съ напряжениями. Это вращательное движеніе представляетъ процессы, совершающіеся въ ээирѣ въ магнитномъ полѣ; средняя вращательная скорость шариковъ представляетъ силу магнитнаго поля въ соответственномъ мѣстѣ, а то направленіе ихъ осей вращенія, въ которомъ слѣдуетъ смотрѣть, чтобы вращеніе казалось правымъ, представляетъ направленіе магнитнаго поля. Въ кольцеобразной магнитной силовой линіи шарики движутся подобно частицамъ жидкости въ вихревомъ кольцѣ (рис. 171). Такъ

какъ скольженіе здѣсь невозможно, то въ пространствѣ, окруженномъ вихревымъ кольцомъ, должно происходить смѣщеніе клѣтокъ въ опредѣленномъ направленіи. При этомъ клѣтки будутъ продвигаться впередъ и протискиваться между окружающими ихъ шариками, такъ какъ послѣдніе, по нашему предположенію, удерживаются твердою сѣткою. Все количество вещества, продвигающееся за секунду, пропорціонально скорости вращенія и числу вращающихся на кольцѣ шариковъ, т.-е. „линейной суммѣ магнитнаго поля“ вдоль кольца. Смѣщеніе и протискиваніе упругихъ клѣтокъ между твердыми шариками не должно происходить непремѣнно во всемъ пространствѣ, ограниченномъ кольцомъ. Если, напримѣръ, полная сумма вращеній на кольцѣ меньшаго радиуса, лежащемъ цѣликомъ внутри перваго кольца, равняется суммѣ вращеній на первомъ кольцѣ, то въ пространствѣ между обоими кольцами шарики и клѣтки вращаются стационарно, т.-е. такъ, что клѣтки не протискиваются въ ту или иную сторону. Въ этомъ случаѣ все поступательное передвиженіе происходитъ лишь въ пространствѣ, ограниченномъ меньшимъ кольцомъ. Если мы при этомъ удержимъ предположеніе, высказанное нами уже, какъ необходимое, при введеніи студнеобразной модели ээира (§ 23), именно, что упругія

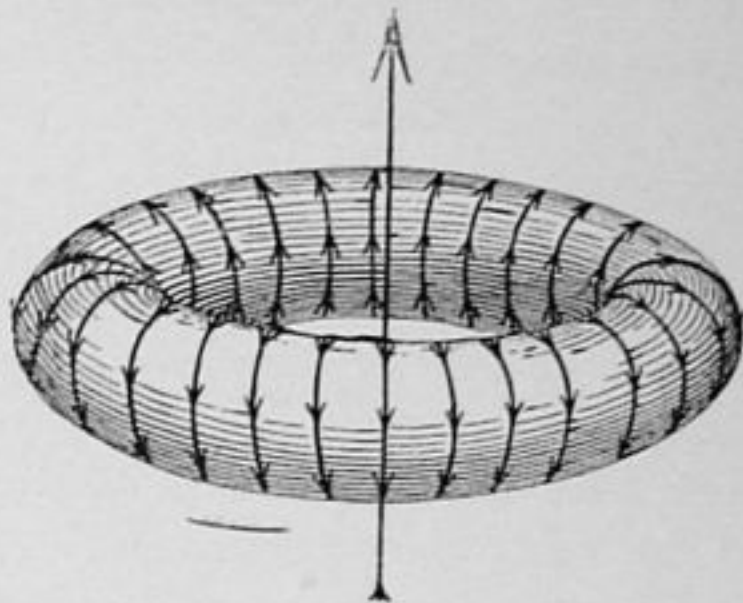


Рис. 171. Движеніе въ вихревомъ кольцѣ.

количество вещества, продвигающееся за секунду, пропорціонально скорости вращенія и числу вращающихся на кольцѣ шариковъ, т.-е. „линейной суммѣ магнитнаго поля“ вдоль кольца. Смѣщеніе и протискиваніе упругихъ клѣтокъ между твердыми шариками не должно происходить непремѣнно во всемъ пространствѣ, ограниченномъ кольцомъ. Если, напримѣръ, полная сумма вращеній на кольцѣ меньшаго радиуса, лежащемъ цѣликомъ внутри перваго кольца, равняется суммѣ вращеній на первомъ кольцѣ, то въ пространствѣ между обоими кольцами шарики и клѣтки вращаются стационарно, т.-е. такъ, что клѣтки не протискиваются въ ту или иную сторону. Въ этомъ случаѣ все поступательное передвиженіе происходитъ лишь въ пространствѣ, ограниченномъ меньшимъ кольцомъ. Если мы при этомъ удержимъ предположеніе, высказанное нами уже, какъ необходимое, при введеніи студнеобразной модели ээира (§ 23), именно, что упругія

напряженія въ этой модели вызываються исключительно смѣщеніями клѣтокъ, т.-е. ихъ протискиваніемъ между твердыми шариками, такъ что всѣ прочія деформациі, въ силу особыхъ свойствъ клѣтокъ, не вызываютъ никакихъ силовыхъ дѣйствій, то, дѣйствительно, въ нашей улучшенной модели вращенія шариковъ, смѣщенія клѣтокъ и напряженія будутъ происходить по тѣмъ самымъ законамъ, по которымъ магнитныя явленія въ ээирѣ вызываютъ и измѣняютъ электрическія смѣщенія и напряженія.

Въ качествѣ проводника мы представляемъ себѣ на нашей модели такую часть пространства, въ которой смѣщеніе клѣтокъ само собою снова уничтожается. Въ примитивной модели мы могли представлять себѣ это, просто считая стѣнки клѣтокъ въ проводникѣ не сплошными. Въ усложненной модели мы вмѣсто этого должны принять, что въ проводникѣ связь клѣтокъ съ шариками не является совершенно прочной, такъ что они могутъ слегка скользить другъ относительно друга. Поэтому, если клѣтки проводника испытываютъ смѣщеніе, то они тотчасъ же соскальзываютъ обратно въ свое нормальное положеніе, если только смѣщеніе не возбуждается непрерывно вновь длительными вращательными движеніями. На рис. 172 представлена механическая модель электрическаго тока въ проволоцѣ въ продольномъ ея сѣченіи. Внѣ проволоки сверху и снизу видны сѣченія кольцевыхъ магнитныхъ силовыхъ линій. Вращенія происходятъ такимъ образомъ, что внутри кольца происходитъ непрерывное перемѣщеніе впередъ въ направленіи прямыхъ стрѣлокъ. Внѣ проводника вращенія стаціонарны, какъ у колесъ часового механизма. Внутри проволоки также находятся „вращательныя кольца“, но здѣсь вращенія постепенно ослабѣваютъ по мѣрѣ перехода къ центральнымъ частямъ и, вслѣдствіе существованія разностей въ скоростяхъ вращеній, упругія клѣтки непрерывно протискиваются. Перемѣщеніе клѣтокъ впередъ компенсируется скольженіемъ ихъ около шариковъ, и напряженіе все время сохраняетъ постоянную величину, при которой оно уравнивается сопротивленіемъ тренія, связаннымъ со скольженіемъ. Это напряженіе, представленное на рис. 172 деформациями клѣтокъ, соотвѣтствуетъ внутреннему электрическому полю проводника. Если явленіе стаціонарно, то и внѣ проводника должно быть постоянное электрическое поле, находящееся въ равновѣсїи съ внутреннимъ полемъ. Поэтому внѣ проволоки должна существовать параллельная ей слагающая поля, къ ко-

торой можетъ присоеди­ниться еще слагающая, перпендикулярная къ поверхности проволоки. На рис. 172 для простоты послѣдняя принята равной нулю, и потому здѣсь видны лишь искривленія въ направ­леніи тока. Если сила тренія скользящихъ частицъ возрастаетъ вмѣстѣ со скоростью скольженія, то сила электрическаго поля возрастаетъ съ силою тока.

Такимъ путемъ можно въ грубыхъ чертахъ построить механическую аналогію явленій электрическаго тока, если пока не имѣть

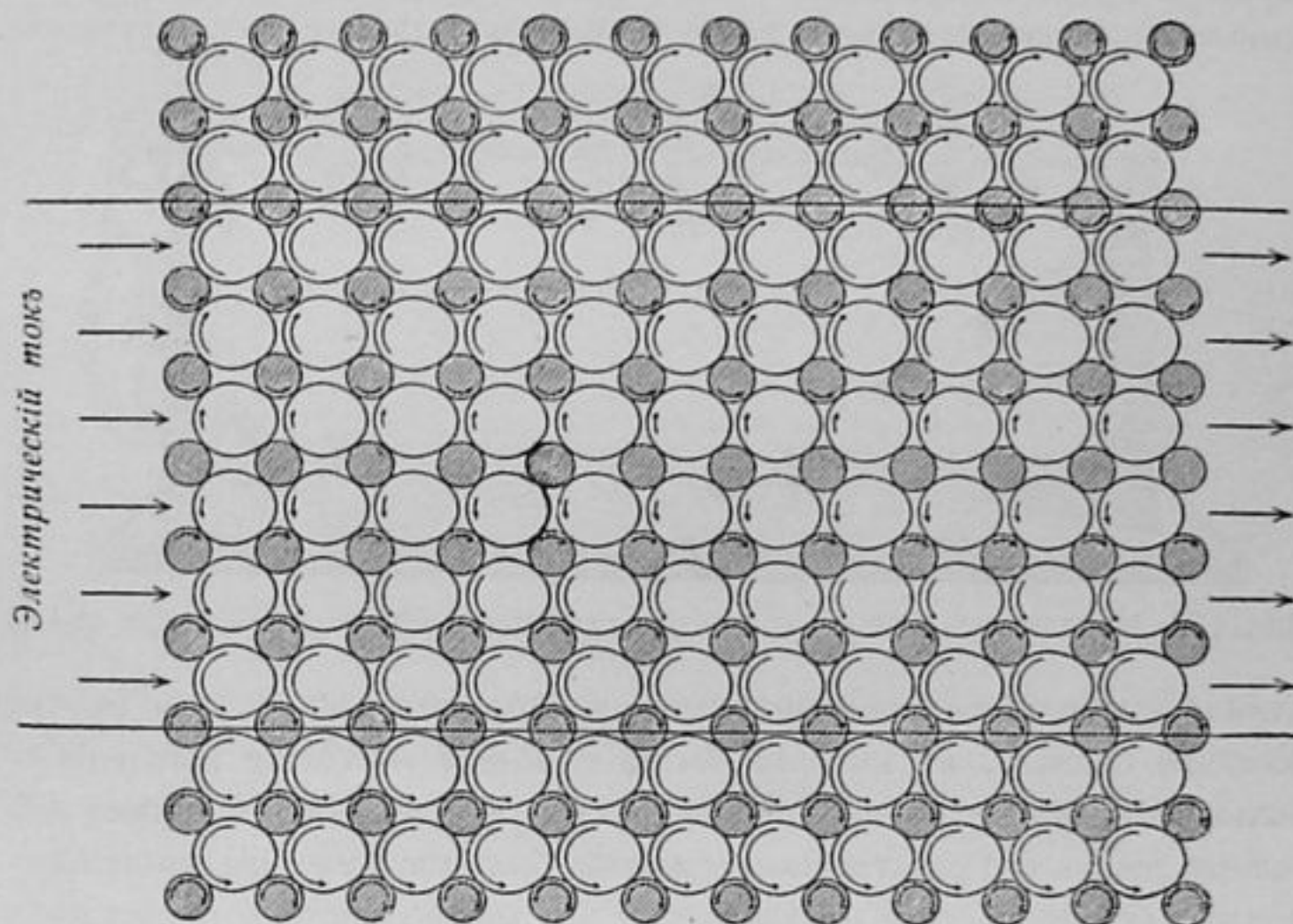


Рис. 172. Механическая модель электрическаго тока.

въ виду атомнаго строенія электрическихъ зарядовъ и іонной теоріи проводимости. Если бы мы желали выразить на модели и эти теоріи, то ее пришлось бы значительно усложнить. Но мы намѣреваемся лишь уяснить себѣ общій характеръ явленій, происходящихъ въ ээирѣ, посредствомъ сравненія ихъ съ привычными намъ механическими явленіями въ вѣсомыхъ тѣлахъ, и отнюдь не стремимся къ установленію теорій, которыя ввели бы насъ глубже въ сущность ээира. Поэтому развивать эту модель дальше для насъ представляется совершенно безцѣльнымъ.

253. Опишемъ вкратцѣ еще одну весьма интересную механическую аналогію, объясняющую фактъ установки магнитной стрѣлки въ направленіи магнитныхъ силовыхъ линій. Маленькій магнитный стержень, какъ мы знаемъ, весьма сходенъ съ маленькимъ соленоидомъ, и мы увидимъ, когда познакомимся съ магнитными свойствами желѣза, что это сходство имѣется и по существу. Поэтому мы можемъ разсматривать магнитный стержень какъ небольшую часть сильной магнитной силовой трубки; на модели ей соотвѣтствуетъ небольшое цилиндрическое пространство, въ которомъ происходятъ сильныя вращенія шариковъ вокругъ осей, параллельныхъ оси стержня.

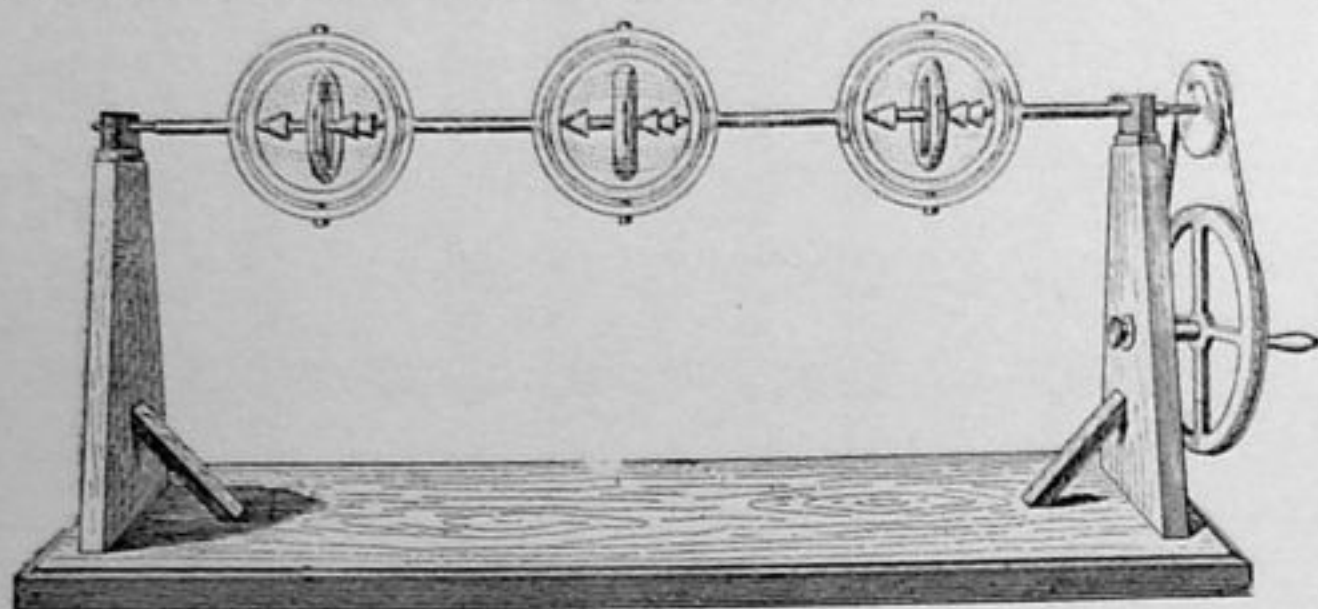


Рис. 173. Модель изъ волчковъ, представляющая магнитную силовую линію.

Если это небольшое цилиндрическое пространство расположено внутри бѳльшей области, въ которой имѣется общее состояніе вращенія — большое магнитное поле, — то оно стремится установиться такимъ образомъ, чтобы его собственныя вращенія были параллельны вращеніямъ общаго большого поля. Механически это можно хорошо представить при помощи модели, изображенной на рис. 173. Длинная ось, которая можетъ быть приведена во вращеніе при помощи рукоятки, изображаетъ магнитную силовую линію; на ней расположены три кольца, представляющія собою какъ бы части оси. Въ этихъ трехъ кольцахъ на особыхъ кардановскихъ подвѣсахъ помѣщены три волчка, оси которыхъ поэтому могутъ быть наклонены подъ любымъ угломъ къ длинной оси модели. Эти три волчка предварительно приводятся въ быстрое вращеніе. Они представляютъ собою три маленькихъ магнитныхъ стерженька. На рис. 173 „сѣверный“ и „южный“ полюса отмѣчены остріями и опереніями на осяхъ волчковъ. Сначала оси волчковъ могутъ быть установлены подъ любыми углами къ главной оси при-

бора. Но если „возбудить магнитное поле“, т.-е. начать медленно вращать большую ось, то всѣ три „магнитика“ тотчасъ же устанавливаются параллельно „силовой линіи“, т.-е. такимъ образомъ, что ихъ оси вращенія совпадаютъ съ главной осью, и направленіе ихъ вращеній совпадаетъ съ направлениемъ вращенія большой оси. Если мы обернемъ „магнитное поле“, т.-е. направленіе вращенія большой оси, то и всѣ три волчка повернутся на 180° и послѣ нѣсколькихъ колебаній въ ту и другую сторону установятся, подобно магнитнымъ стрѣлкамъ, въ новомъ направленіи большой „силовой линіи“.

ГЛАВА III

НАПРЯЖЕНІЕ И СИЛА ТОКА

ЗАКОНЪ ОМА.

254. Въ пространствѣ, окружающемъ проводникъ съ токомъ, эѳиръ находится въ состояніи какъ электрическаго, такъ и магнитнаго возбужденія. Полная величина магнитнаго поля постоянна вдоль всего проводника. Она измѣряется при помощи гальванометра; градуированный гальванометръ чаще называется амперметромъ. Включается амперметръ такимъ образомъ, что въ проводникѣ съ токомъ дѣлается въ нѣкоторомъ мѣстѣ разрывъ и въ него вводится катушка инструмента. Такимъ образомъ въ инструментъ вводится магнитное поле, и оно можетъ быть имъ измѣрено. Какъ мы видѣли, магнитное поле показываетъ силу тока іоновъ (или электроновъ) въ проводникѣ. Поэтому амперметръ градуируется при помощи кулонметра, и слово „сила тока“ часто употребляется въ смыслѣ: „полная величина магнитнаго поля тока“. О полной величинѣ электрическаго поля можно говорить лишь по отношенію къ промежутку между какими-либо двумя опредѣленными точками проводника. Ее измѣряютъ помощью электрометра; градуированный электрометръ называется также вольтметромъ. Включение вольтметра производится такимъ образомъ, что его оба зажима соединяются посредствомъ металлическихъ проволокъ съ двумя точками, между которыми измѣряется напряженіе эѳира. Такимъ образомъ электрическое поле вводится въ инструментъ и можетъ быть имъ измѣрено.

Соединимъ концы металлической проволоки съ полюсами небольшой батареи и введемъ амперметръ въ одинъ изъ проводовъ, подводящихъ токъ. Затѣмъ къ обоимъ концамъ проволоки присоединимъ зажимы электрометра. Такимъ образомъ мы можемъ одновременно измѣрять силу тока въ проволоку и напряженіе между ея концами (рис. 174). Если, включая проволоки различныхъ длинъ

(реостаты, § 257) или измѣняя число элементовъ въ батареѣ, мѣнять показываемую амперметромъ силу тока, то параллельно будетъ мѣняться также и величина напряженія между концами проволоки. При этомъ легко установить нижеслѣдующую простую зависимость, которая называется *закономъ Ома*:

Электрическое напряженіе между концами однороднаго проводника всегда пропорціонально силѣ тока въ проводникѣ.

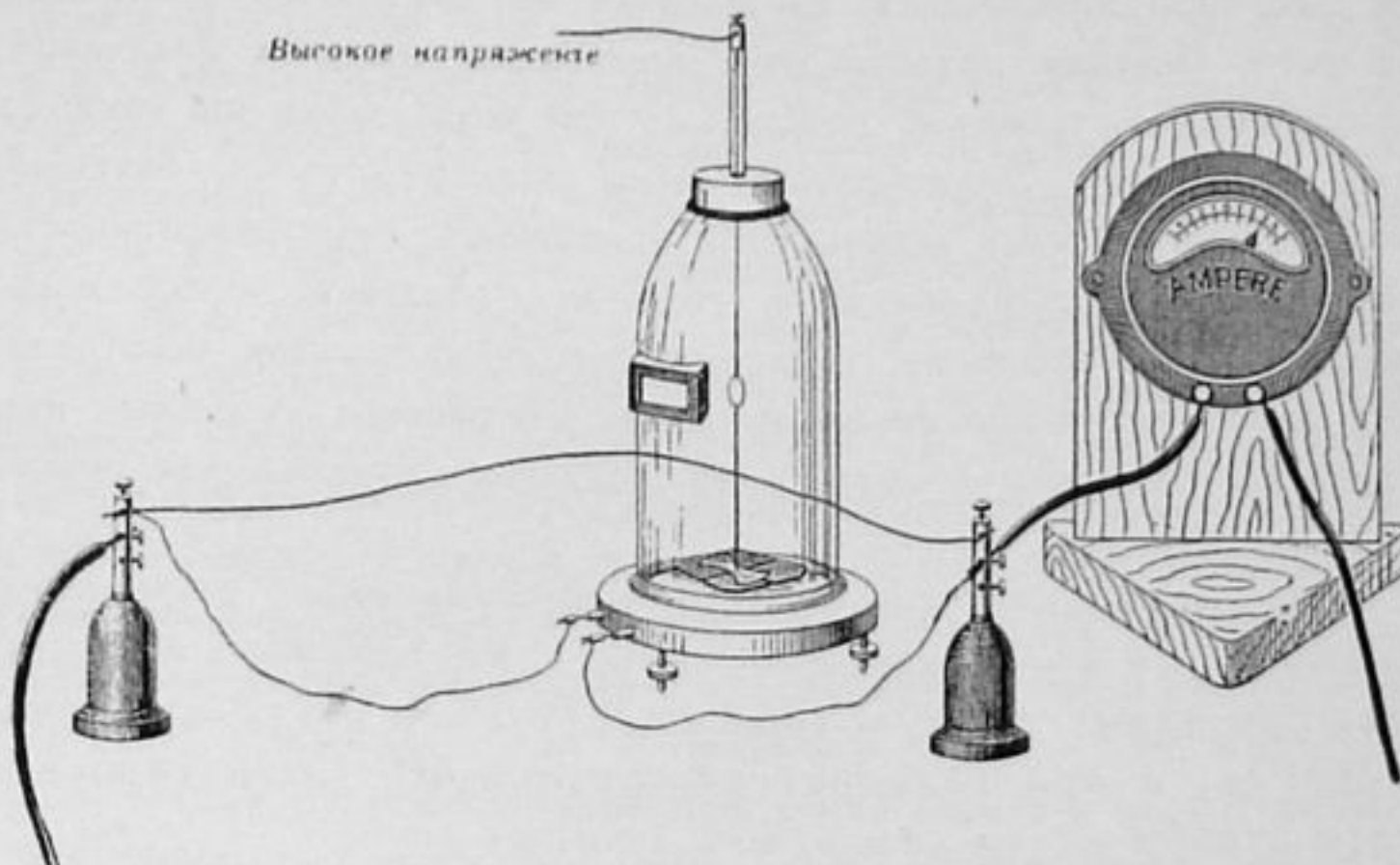


Рис. 174. Повѣрка закона Ома.

Постоянное отношеніе напряженія къ силѣ тока называютъ сопротивленіемъ проводника.

Если V — напряженіе, J — сила тока, R — сопротивление, то

$$V = R \cdot J; J = \frac{V}{R}.$$

Если сила тока равна нулю, то и $V = 0$, т.-е. потенциалъ постояненъ вдоль всей проволоки; въ этомъ заключается условіе равновѣсія электрическаго поля, указанное нами въ § 26.

Если проводникъ не однороденъ, но состоитъ изъ проволокъ различныхъ металловъ, соединенныхъ между собою (мѣдной, желѣзной, никкелиновой и т. д.), то, въ случаѣ не вполне одинаковой температуры вдоль всего проводника, наблюдается и при отсутствіи тока нѣкоторое напряженіе между концами проволоки — термоэлектрическое напряженіе (§ 214). Если термоэлектрическое напряженіе

равняется V_0 , а напряжение, получаемое при прохождении через всю систему проводниковъ тока силы J , равняется V , то, по закону Ома,

$$V - V_0 = R \cdot J,$$

гдѣ R — сопротивление всѣхъ проводовъ.

ЛЕГАЛЬНАЯ ЕДИНИЦА СОПРОТИВЛЕНІЯ.

255. Законъ Ома настолько строго приложимъ къ металламъ, что даже при тончайшихъ измѣреніяхъ не замѣчается отклоненій отъ него. Поэтому сопротивление проводника является величиной, опредѣлимой съ большой точностью; при этомъ, какъ мы увидимъ ниже, и сравненія сопротивленій легко производятся съ большою точностью. Такъ какъ, кромѣ того, проводникъ — при неизмѣнности всѣхъ вообще его физическихъ свойствъ — обладаетъ также неизмѣннымъ сопротивленіемъ, то нормальныя сопротивления изготовляются весьма легко. По международному соглашенію въ основу ихъ устройства положена *единица сопротивленія*, опредѣляемая слѣдующимъ образомъ:

Единицей электрическаго сопротивленія обладаетъ столбъ ртути въ стеклянной трубкѣ постояннаго сѣченія, имѣющей длину, равную 106,3 см., при вѣсѣ ртути, равномъ 14,4521 гр., и при температурѣ, равной 0° . Сопротивленіе этого столба ртути называютъ 1 омомъ.

Въ опредѣленіи ома указывается вѣсъ столба ртути, а не его поперечное сѣченіе, такъ какъ вѣсъ опредѣляется легче и точнѣе. Это сѣченіе равняется въ точности 1 кв. мм., такъ какъ удѣльный вѣсъ ртути при 0° равенъ 13,5956.

Такъ опредѣленная единица сопротивленія является собственно излишней единицей, такъ какъ сопротивление опредѣляется численно изъ уравненія $V = J \cdot R$, если установлены единицы V и J . При опредѣленіи легальнаго ома было обращено вниманіе на то, чтобы оставались въ силѣ какъ опредѣленія, приведенныя въ § 37, § 100 и здѣсь, такъ и законъ Ома.

Когда черезъ проводникъ, имѣющей сопротивление R омовъ, течетъ электрической токъ въ $J \frac{\text{кулонъ}}{\text{секунда}}$, то напряженіе между концами проводника равняется $V = R \cdot J$ вольтамъ.

То обстоятельство, что для единицы сопротивленія было установлено, независимо отъ закона Ома, еще особое опредѣленіе, осно-

вывається на томъ, что электрическія сопротивленія особенно легко воспроизводить. Быть можетъ, было бы удобнѣе упразднить единицу напряженія или единицу заряда, такъ какъ эти единицы труднѣе воспроизводить, и замѣнить ее уравненіемъ Ома. Однако, до сихъ поръ не могли рѣшиться на непрямоe опредѣленіе этихъ величинъ, являющихся основными во всей области электрическихъ измѣреній¹⁾. Во всякомъ случаѣ, всѣ три единицы опредѣлены настолько точно, что при самыхъ тонкихъ современныхъ измѣреніяхъ не оказывается никакого отступленія отъ зависимости $V = R \cdot J$. Если когда-нибудь будутъ найдены еще болѣе точные измѣрительные методы, нежели современные, то все же можно будетъ оставить въ силѣ нынѣ узаконенныя опредѣленія единицъ вольтъ, кулонъ и омъ и просто ввести въ уравненіе Ома поправочный множитель C . Уравненіе Ома тогда приметъ видъ $V = C \cdot R \cdot J$; множитель C , во всякомъ случаѣ, настолько мало будетъ отличаться отъ единицы (навѣрное, меньше, чѣмъ на одну десятитысячную), что его обычно можно будетъ опускать. Нѣчто аналогичное мы имѣемъ въ нашемъ опредѣленіи единицы вѣса: мы имѣемъ, во-первыхъ, спеціальныи эталонъ — платиновый килограммъ, хранящійся въ парижскомъ Бюро Мѣръ и Вѣсовъ, и, во-вторыхъ, непрямоe опредѣленіе, согласно которому, вѣсъ единицы объема воды при 4° равняется единицѣ. Оба опредѣленія, конечно, не могутъ математически точно совпасть между собою, но они отличаются другъ отъ друга столь незначительно, что на разницу практически никогда не обращаютъ вниманія.

Уравненіе Ома прямо даетъ намъ простой и точный способъ измѣренія сопротивленія, если въ нашемъ распоряженіи имѣются градуированные измѣрители тока и напряженія. Пропустимъ черезъ изслѣдуемый проводникъ токъ, измѣримъ его силу J амперметромъ и одновременно измѣримъ напряженіе V между концами проводника вольтметромъ. Въ такомъ случаѣ сопротивленіе R вычислится по формулѣ

$$R = \frac{V}{J} \text{ омовъ.}$$

¹⁾ Согласно постановленію международнаго конгресса въ Лондонѣ 1908 года, омъ опредѣляется, какъ здѣсь указано, амперъ опредѣляется, какъ указано въ § 100, а вольтъ является производною единицею, опредѣляемою на основаніи первыхъ двухъ изъ закона Ома. *Прим. пер.*

СОЕДИНЕНІЕ НѢСКОЛЬКИХЪ ПРОВОДНИКОВЪ.

256. Если мы соединимъ послѣдовательно нѣсколько проводниковъ и включимъ источникъ тока, то по всѣмъ проводникамъ будетъ проходить одинъ и тотъ же токъ J . Если сопротивленія отдѣльныхъ проводниковъ суть R_1, R_2, \dots, R_n , то напряженіе между концами перваго проводника равняется $V_1 = R_1 \cdot J$, между концами втораго $V_2 = R_2 \cdot J, \dots$, между концами послѣдняго $V_n = R_n \cdot J$. Напряженіе между началомъ и концомъ всей системы проводовъ, по закону равновѣсія напряженій, равняется

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n = (R_1 + R_2 + \dots + R_n) \cdot J.$$

Назовемъ, какъ обычно, отношеніе напряженія V къ силѣ тока J сопротивленіемъ R всей системы проводовъ; въ такомъ случаѣ

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

При послѣдовательномъ соединеніи нѣсколькихъ проводниковъ ихъ сопротивленія слагаются.

Если же всѣ n проводниковъ соединены параллельно между точками A и B , между которыми электрическое напряженіе равняется V , то черезъ всѣ проводники идутъ токи вообще различной силы. Если въ первомъ проводникѣ сила тока равняется J_1 , во второмъ J_2, \dots , въ послѣднемъ J_n , то, по закону Ома и согласно закону равновѣсія напряженій,

$$V = R_1 \cdot J_1, \quad V = R_2 \cdot J_2, \quad \dots \quad V = R_n \cdot J_n.$$

Въ общемъ черезъ A и B проходитъ токъ силы $J = J_1 + J_2 + \dots + J_n$, и, слѣдовательно,

$$J = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \right).$$

Сопротивленіе R всей системы проводниковъ въ этомъ случаѣ вычисляется изъ уравненія

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Обратную величину сопротивленія $\frac{1}{R}$ часто называютъ проводимостью проводника. Слѣдовательно, при параллельномъ соединеніи нѣсколькихъ проводниковъ слагаются обратныя величины ихъ сопротивленій — ихъ проводимости.

РЕОСТАТЫ.

257. На вышеизложенныхъ правилахъ соединенія проводниковъ основывается устройство переменныхъ сопротивлений — реостатовъ.

Весьма простую форму переменнаго сопротивленія представляетъ собою реостатъ со скользящимъ контактомъ (рис. 175). Проволока съ довольно большимъ сопротивленіемъ намотана на хорошо изолирующемъ цилиндрѣ (напримѣръ, фарфоровомъ). Оба конца ея со-

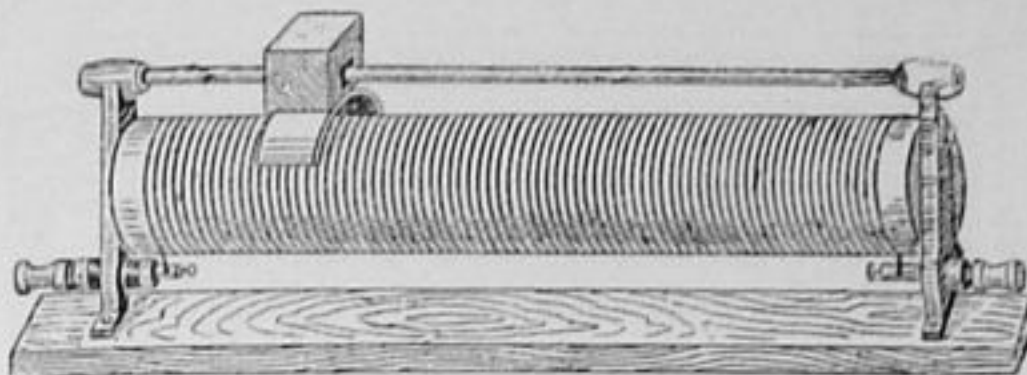


Рис. 175. Реостатъ со скользящимъ контактомъ.

единены съ двумя зажимами, изъ которыхъ одинъ хорошо изолированъ отъ металлической рамы реостата, а другой соединенъ съ нею проводящимъ образомъ. По обмоткѣ цилиндра перемѣщается латунная пружина, соединенная проводникомъ съ латуннымъ стержнемъ, служащимъ для ея передвиженій. Этотъ стержень находится въ хорошо проводящемъ соединеніи съ металлической рамой, а потому также со вторымъ зажимомъ. Сопротивленіе толстаго латуннаго

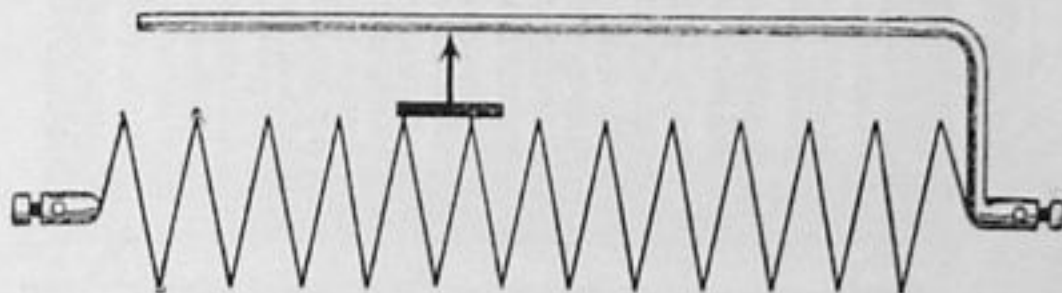


Рис. 176. Схема реостата со скользящимъ контактомъ.

стержня весьма мало сравнительно съ сопротивленіемъ обмотки. Поэтому между обоими зажимами существенную роль играетъ лишь сопротивленіе части проволочной обмотки, заключенной между первымъ зажимомъ и передвижнымъ контактомъ (рис. 176). Чѣмъ большее количество оборотовъ проволоки мы введемъ, тѣмъ больше сопротивление.

Съ описаннымъ реостатомъ весьма сходенъ по устройству реостатъ съ вращающейся рукояткой (рис. 177). На доскѣ изъ хорошо изолирующаго матеріала (шифера) расположены дугообразно

на равныхъ разстояніяхъ другъ отъ друга нѣсколько латунныхъ кнопокъ; каждая пара этихъ кнопокъ соединена проволокой, имѣющей значительное сопротивленіе (рис. 178). Вокругъ центра дуги, образуемой кнопками, перемѣщается при помощи рукоятки тугая латунная пружина, конецъ которой скользитъ какъ разъ по кнопкамъ. Реостатъ снабженъ двумя зажимами, изъ которыхъ одинъ сообщенъ съ осью латунной пружины, а другой съ одной изъ крайнихъ ла-

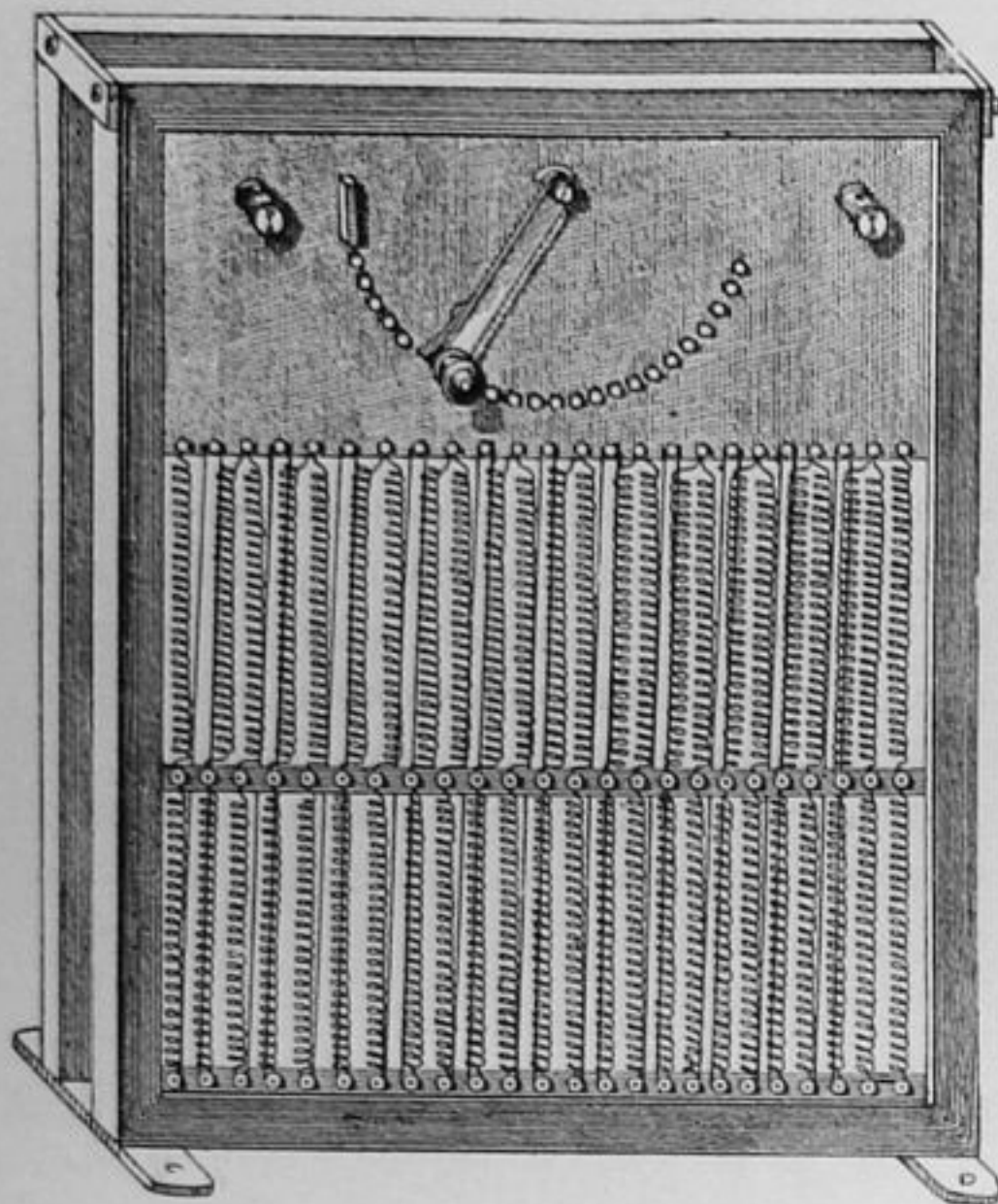


Рис. 177. Реостатъ съ вращающейся рукояткой.

тунныхъ кнопокъ. Вращеніемъ рукоятки можно произвольно измѣнять число введенныхъ между обоими зажимами проволокъ большаго сопротивленія.

Обычно пользуются при измѣреніяхъ штепсельнымъ реостатомъ (рис. 179). Въ немъ проволоки, вводимыя въ качествѣ сопротивленій, смотаны въ катушки и помѣщены въ деревянный ящикъ, снабженный эбонитовой крышкой. На этой крышкѣ расположены въ опредѣленномъ порядкѣ толстыя латунныя планки, тщательно изолированныя одна отъ другой. Каждая двѣ послѣдовательныя планки

соединены между собою внутри ящика через посредство одной из катушекъ (рис. 180). Величина сопротивленія каждой изъ катушекъ

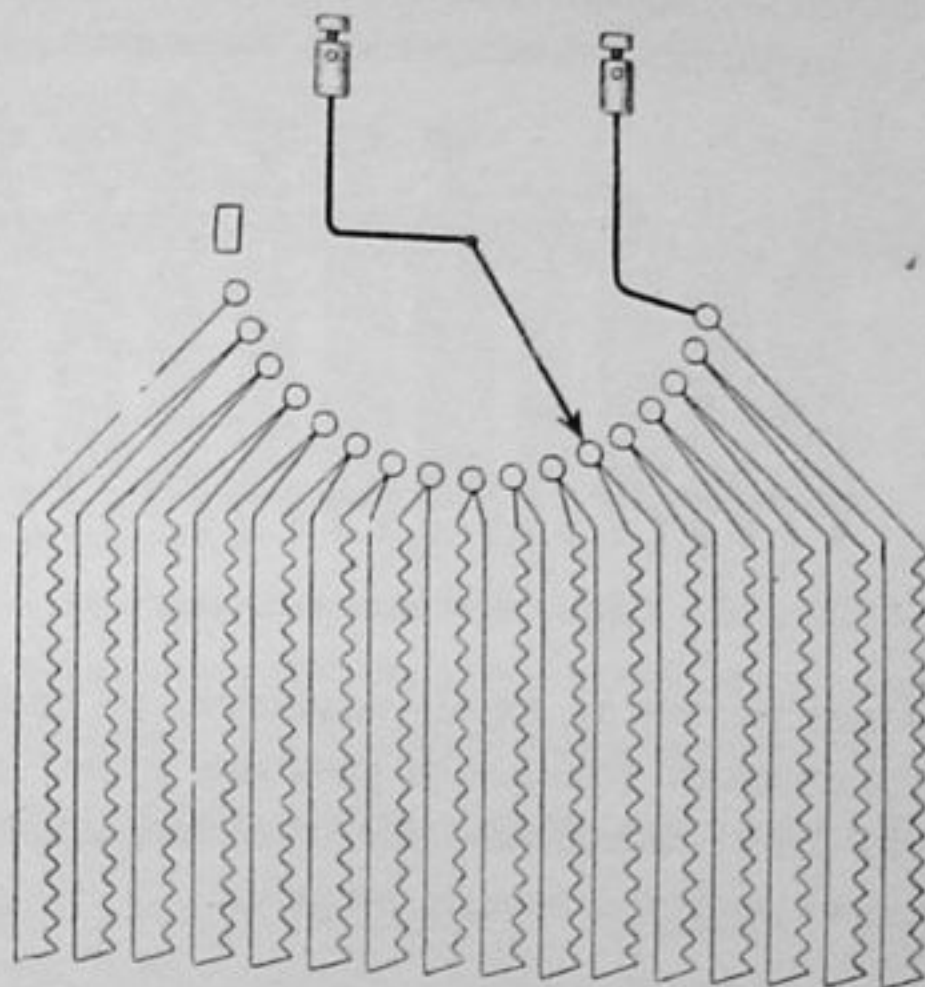


Рис. 178. Схема реостата съ вращающейся рукояткой.

указывается числомъ, стоящимъ на эбонитовой крышкѣ у соответственнаго промежутка между планками. Каждый изъ этихъ проме-

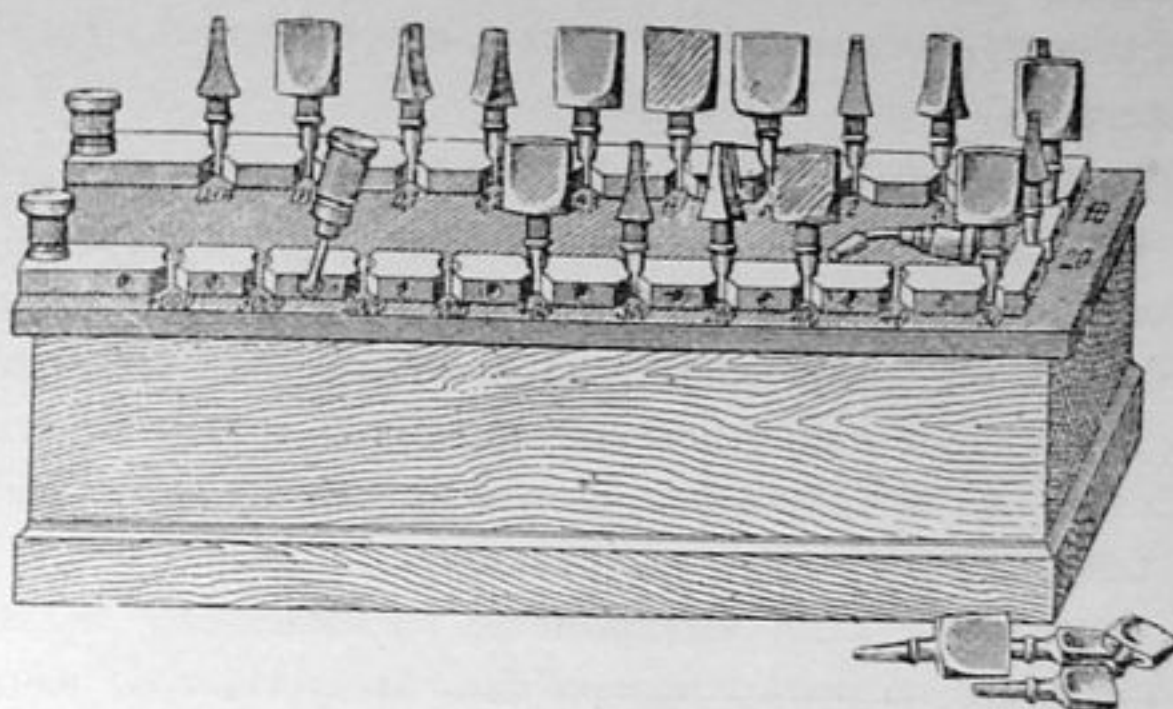


Рис. 179. Штепсельный реостатъ.

жутковъ снабженъ посрединѣ круглымъ отверстіемъ, и въ эти отверстія плотно вставляются слегка коническіе латунные штепсели.

Подобнымъ штепселемъ можно коротко замкнуть сопротивление, соединяющее двѣ послѣдовательныя планки. Сопротивленія планокъ и штепселей практически являются ничтожно малыми по сравненію съ сопротивлениями катушекъ, помѣщенныхъ въ ящикъ. Если штепсель

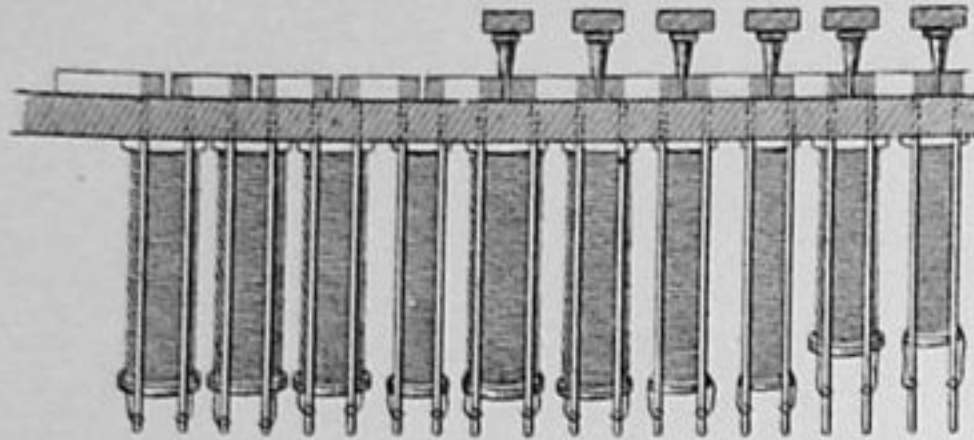


Рис. 180. Схема штепсельнаго реостата.

вставленъ въ отверстіе между двумя планками, то сопротивление въ этомъ мѣстѣ практически становится равнымъ нулю; если же штепсель вынуть, то этимъ включено сопротивление, величина котораго дается написаннымъ около отверстія числомъ.

ЭЛЕКТРОМЕТРЪ, КАКЪ ИЗМѢРИТЕЛЬ ТОКА.

258. По закону Ома напряженіе между концами неизмѣннаго сопротивленія находится въ опредѣленной связи съ силою тока въ сопротивленіи. Поэтому иногда возможно, пользуясь неизмѣннымъ сопротивленіемъ, измѣрять силы тока электрометромъ, а напряженія гальванометромъ.

Измѣренія перваго рода удобны въ тѣхъ случаяхъ, когда приходится измѣрять малыя силы тока въ цѣпи съ большимъ сопротивленіемъ. Примѣромъ можетъ служить случай, описанный выше въ § 126. Для измѣренія силы тока помощью электрометра вводятъ въ цѣпь неизмѣнное сопротивление, малое по сравненію съ имѣющимся уже въ цѣпи сопротивленіями и потому не вліяющее замѣтно на силу тока; концы этого сопротивления соединяютъ съ электрометромъ (рис. 181). Если электрометръ показываетъ V вольтъ, а сопротивление, къ которому приключенъ электрометръ, равняется R омамъ, то искомая сила тока въ цѣпи равняется $J = \frac{V}{R}$ амперамъ. Въ случаѣ, рассмотрѣнномъ въ § 126, сопротивление въ ионизируемомъ воздухѣ было настолько велико, что можно было, въ качествѣ отно-

нительно малаго сопротивленія, включить параллельно электрометру описанное тамъ амаль-алкогольное сопротивленіе, подчиняющееся закону Ома. Такимъ образомъ можно пользоваться совершенно определенными сопротивленіями въ нѣсколько миллиардовъ омовъ и измѣрять силы тока, на которыя не реагируетъ даже чувствительнѣйшій гальванометръ. Бронзонъ (Bronson) недавно предложилъ пользоваться при такихъ измѣреніяхъ чрезвычайно большимъ сопротивленіемъ изъ воздуха, іонизированнаго лучами радія.

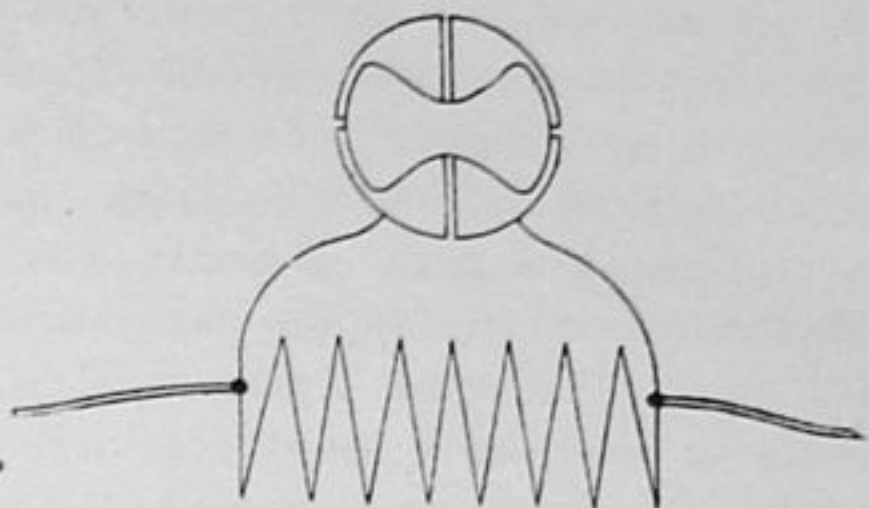


Рис. 181. Электрометр въ качествѣ измѣрителя тока.

ГАЛЬВАНОМЕТРЪ, КАКЪ ИЗМѢРИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНІЯ.

259. Обратнo, часто оказывается удобнымъ измѣрять напряженія при помощи гальванометра, если сопротивленіе самага источника электричества и сопротивленіе проводовъ отъ источника до тѣхъ двухъ точекъ, между которыми измѣряется напряженіе, весьма малы. Примѣръ такого рода мы имѣли уже въ § 214, гдѣ приходилось измѣрять весьма малое напряженіе между зажимами термоэлемента. Методъ измѣренія въ этомъ случаѣ заключается въ слѣдующемъ: обѣ точки *A* и *B*, между которыми должно быть измѣрено напряженіе (рис. 182), мы соединяемъ съ зажимами гальванометра, имѣ-

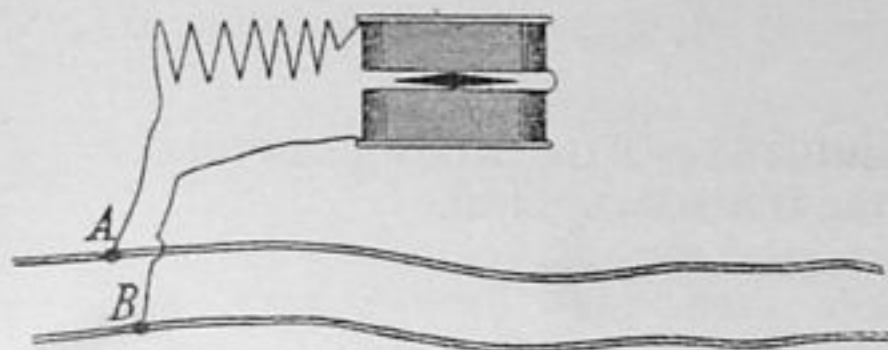


Рис. 182. Гальванометръ въ качествѣ измѣрителя напряженій.

ющаго въ самыхъ своихъ катушкахъ или въ приключенной къ нему проволочной катушкѣ относительно большое „внутреннее“ сопротивленіе. Если черезъ гальванометръ проходитъ

токъ въ J амперъ и все сопротивленіе гальванометра равно R омамъ, то искомое напряженіе между *A* и *B* равняется $V = R \cdot J$ вольтамъ.

Этотъ методъ, благодаря удобству его примѣненія, столь часто употребляется въ электротехникѣ, что подъ словомъ „вольтметръ“

или лучше „технической вольтметръ“, обычно понимаютъ гальванометръ съ большимъ сопротивленіемъ. Полезно, однако, имѣть въ виду, что употребленіе технического вольтметра ограничивается определенными рамками. Имъ нельзя пользоваться, если въ источникѣ электричества содержатся большія сопротивления, или если напряженіе возникаетъ вслѣдствіе процессовъ, протекающихъ въ изоляторахъ, какъ въ электрическихъ машинахъ, или если измѣряются напряженія конденсаторовъ. Нельзя имъ пользоваться также и въ томъ случаѣ, если токъ, проходящій черезъ вольтметръ, какимъ-либо образомъ вліяетъ на измѣряемое напряженіе, напримѣръ, черезъ электролитическую поляризацию, какъ въ случаѣ нормальныхъ элементовъ, отъ которыхъ можно брать лишь очень слабые токи (§ 116). Такимъ образомъ, специальнымъ измѣрителемъ напряженія, который можно употреблять при всевозможныхъ обстоятельствахъ, остается попрежнему электрометръ.

Такъ какъ технической вольтметръ во многомъ сходенъ съ амперметромъ, то мы отмѣтимъ здѣсь еще разъ вкратцѣ различіе между обоими инструментами.

Въ амперметрѣ внутреннее сопротивление дѣлаютъ возможно меньшимъ; въ вольтметрѣ внутреннее сопротивление дѣлается настолько большимъ, насколько это возможно безъ замѣтнаго пониженія его чувствительности.

Включается амперметръ такимъ образомъ, что его катушка непосредственно вводится въ цѣпь; вольтметръ же включается такъ, что оба его зажима соединяются съ тѣми двумя точками, между которыми измѣряется напряженіе. Зажимы технического вольтметра поступаютъ, такимъ образомъ, на мѣсто зажимовъ электрометра (§ 254).

ИЗМѢРИТЕЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХЪ ОБЛАСТЕЙ ИЗМѢРЕНІЙ.

260. Весьма удобнымъ свойствомъ технического вольтметра является чрезвычайная легкость, съ которою можетъ быть измѣнена область измѣреній, для которой приборъ предназначается. Если сопротивление вольтметра равняется R , то включеніемъ предварительнаго сопротивления, равнаго $9R$, чувствительность инструмента понижается въ десять разъ. То же отклоненіе, которое безъ предварительнаго сопротивления, соотвѣтствовало 1 вольту, при введеніи

указаного предварительнаго сопротивленія, соотвѣтствуетъ 10 вольтамъ. Продажные вольтметры часто имѣютъ нѣсколько предварительныхъ сопротивленій, которыя могутъ быть вводимы и выводимы помощью штепселей. Такимъ инструментомъ можно измерять съ одинаковою процентною точностью какъ малыя напряженія до нѣсколькихъ милливольтъ, такъ и большія напряженія, равныя многимъ вольтамъ.

Амперметры также могутъ быть приспособлены для различныхъ областей измереній. Понятно, что этого нельзя достигнуть включеніемъ предварительныхъ сопротивленій, такъ какъ въ этомъ случаѣ весь измеряемый токъ ослаблялся бы до тѣхъ предѣловъ, для которыхъ пригоденъ амперметръ. Если желательно измерять амперметромъ болѣе сильныя токи, нежели тѣ, для измеренія которыхъ онъ построенъ, то нужно устроить такъ, чтобы отъ сильнаго тока отвѣтвлялась небольшая часть его и проходила черезъ амперметръ. Иными словами, область измереній для даннаго амперметра мѣняють помощью отвѣтвленій. Если, на примѣръ, сопротивление отвѣтвленія равно $\frac{1}{9} R$, гдѣ R — сопротивление катушки амперметра, то, согласно правилу развѣтвленія токовъ (§ 256), токъ въ отвѣтвленіи относится къ току въ катушкѣ амперметра, какъ 9 къ 1. Иными словами, изъ всего тока въ цѣпи $\frac{9}{10}$ пойдутъ черезъ отвѣтвленіе и лишь $\frac{1}{10}$ пойдетъ черезъ катушку амперметра. То же отклоненіе указателя, которое безъ отвѣтвленія соотвѣтствовало 1 амперу, при наличности этого отвѣтвленія¹⁾ будетъ соотвѣтствовать 10 амперамъ. Многіе продажные амперметры снабжены отвѣтвленіями, которыя можно приключать и выключать помощью штепселей, такъ что однимъ и тѣмъ же инструментомъ можно пользоваться для измереній въ различныхъ областяхъ.

ПОТЕРИ НАПРЯЖЕНІЯ ВЪ ПРОВОДАХЪ.

261. При снабженіи электрической энергіей большой области, на примѣръ, города, чрезвычайно важно, чтобы въ распоряженіи каждаго потребителя находилось постоянное электрическое напряженіе между двумя проводами, проведенными въ его установку. Электрическія лампы и почти всѣ электротехническія аппараты обладаютъ

¹⁾ Такое отвѣтвленіе обычно называется шунтомъ.

Предѣльные значенія эквивалентной провідности отдѣльныхъ іоновъ при 18°.

Катионы		Анионы	
K 64,7	$\frac{1}{2}$ Sr 54	Cl 65,4	JO ₃ 33,9
Na 43,6	$\frac{1}{2}$ Ca 53	Br 66	JO ₄ 48
Li 33,4	$\frac{1}{2}$ Mg 47	J 66	CHO ₂ 46
NH ₄ 64	$\frac{1}{2}$ Zn 47	NO ₃ 61,8	C ₂ H ₃ O ₂ 34
Ag 56	$\frac{1}{2}$ Cu 48	ClO ₃ 56	$\frac{1}{2}$ SO ₄ 70
$\frac{1}{2}$ Ba 57	H 318	ClO ₄ 64	OH 174

Изъ данныхъ этой таблицы можно, суммируя Λ_A и Λ_K , получить величины предѣльной электропроводности любого соляного раствора, анионъ и катионъ котораго имѣются въ таблицѣ. Такъ, для KCl $\Lambda = 64,7 + 65,4 = 130,1$; для AgNO₃ $\Lambda = 56 + 61,8 = 117,8$ и т. д.

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ.

271. Въ электролитахъ обѣ силы тока J_A и J_K пропорціональны, во-первыхъ, числу заряженныхъ электричествомъ частичекъ, называемыхъ іонами, въ 1 куб. см., и, во-вторыхъ, скорости, съ которою онѣ движутся въ жидкости. Законъ Ома указываетъ намъ, что въ определенномъ электролитѣ скорость частицъ пропорціонона силѣ поля, т.-е. силѣ, дѣйствующей на частицы въ электрическомъ полѣ. Такъ какъ эта сила должна уравновѣшиваться сопротивленіемъ тренія, испытываемымъ движущимися іонами, то законъ Ома и здѣсь является тождественнымъ съ закономъ Пуазейля, согласно которому сопротивление тренія, испытываемое движущимся въ жидкости тѣломъ, пропорціононально его скорости.

Распаденіе молекулъ соли на іоны слѣдуетъ, вѣроятно, представлять себѣ такимъ образомъ, что вода оказываетъ на соль непрерывное іонизирующее дѣйствіе, подобно тому какъ эманация іонизируетъ газъ, къ которому она примѣшана. Число іоновъ, непрерывно образующихся въ каждую секунду, пропорціононально количеству имѣющихся въ наличности неразложенныхъ молекулъ соли. Этому непрерывному процессу іонизации противодѣйствуетъ самопроизвольное соединеніе іоновъ, сталкивающихся между собою и снова соединяющихся въ молекулы. Эти рекомбинаціи происходятъ, какъ и въ газахъ (§ 127), тѣмъ чаще, чѣмъ больше приходится іоновъ на 1 куб. см. Если растворъ сильно разбавленъ, то

рекомбинація настолько слабо вліяєть на іонизирующее дѣйствіе воды, что въ растворѣ оказываются почти исключительно іоны и лишь весьма немногія недиссоціированныя молекулы. Этотъ теоретическій выводъ вполне подтверждается измѣреніями надъ пониженіемъ точки замерзанія весьма разбавленныхъ растворовъ, которыя указываютъ, что число растворенныхъ частичекъ равняется числу іоновъ, образующихся при расщепленіи молекулъ.

Эта теорія объясняетъ, почему эквивалентная проводимость растворовъ солей непрерывно возрастаетъ съ разбавленіемъ. Число іоновъ тѣмъ больше по сравненію со всѣмъ количествомъ растворенной соли, чѣмъ сильнѣе разбавленъ растворъ. Предѣльное значеніе эквивалентной проводимости соотвѣтствуетъ совершенной диссоціации всѣхъ молекулъ соли. Предѣльная величина эквивалентной проводимости для опредѣленнаго рода іоновъ даетъ намъ проводимость одного эквивалента свободныхъ іоновъ этого рода, находящихся въ растворѣ. Этимъ вполне разъясняется законъ Кольрауша.

СКОРОСТЬ ПЕРЕНОСА И ВЕЛИЧИНА ІОНОВЪ.

272. По величинѣ предѣльной проводимости для опредѣленнаго рода іоновъ можно вычислить скорость, съ которою эти іоны движутся въ электрическомъ полѣ $E \frac{\text{вольтъ}}{\text{см.}}$. Если мы назовемъ скорости катіона и аніона соотвѣтственно черезъ v_K и v_A , то токъ J на квадратный сантиметръ раствора, содержащаго V граммъ-эквивалентовъ іонизированныхъ молекулъ на одинъ кубическій сантиметръ, равняется $J_A + J_K = (v_A + v_K) v \cdot 96540$, такъ какъ каждый граммъ-эквивалентъ несетъ зарядъ, равный 96540 кулонамъ. Въ сильно разбавленныхъ растворахъ концентрація іоновъ равна всей концентраціи раствора, такъ какъ всѣ молекулы диссоціированы, т.-е. $v = \eta$. Отсюда слѣдуетъ, что $J = (\Lambda_K + \Lambda_A) v E$ и, слѣдовательно,

$$v_K = \frac{\Lambda_K}{96540} E; \quad v_A = \frac{\Lambda_A}{96540} E.$$

Здѣсь Λ_K и Λ_A суть предѣльныя значенія проводимости. Если мы положимъ

$$v_K = u_K \cdot E, \quad v_A = u_A \cdot E,$$

гдѣ u_K и u_A — скорости іоновъ въ полѣ силы 1 $\frac{\text{вольтъ}}{\text{см.}}$, которыя мы сокращенно будемъ называть скоростями переноса іоновъ, то

$$u_K = \frac{\Lambda_K}{96540}, \quad u_A = \frac{\Lambda_A}{96540}.$$

Вмѣсто Λ_K и Λ_A сюда слѣдуетъ подставить числа таблицы, приведенной въ § 270. Такъ напримѣръ, для скорости переноса іона калия находимъ $u = 0,000670 \frac{\text{см.}}{\text{сек.}}$, для іона натрія $u = 0,000452 \frac{\text{см.}}{\text{сек.}}$ (ср. § 128).

Какъ мы видѣли, зарядъ одновалентнаго іона $\epsilon = 1,564 \cdot 10^{-19}$ кулона (§ 106); слѣдовательно, силовое дѣйствіе, испытываемое имъ въ полѣ $E \frac{\text{вольтъ}}{\text{см.}}$, равняется $P = \epsilon \cdot E$, если пользоваться единицей силы, указанной въ § 82. Измѣреніе, описанное въ § 102, указываетъ, что эта единица силы равняется 10^7 динъ. Поэтому сила, дѣйствующая на іонъ въ полѣ $E \frac{\text{вольтъ}}{\text{см.}}$, равняется

$$P = 1,564 \cdot E \cdot 10^{-12} \text{ динъ.}$$

Эта сила должна равняться сопротивленію тренія при движеніи іона въ водѣ. Если ρ есть коэффициентъ тренія въ *C.-G.-S* единицахъ и если мы примемъ, что іонъ имѣетъ форму шара діаметра a , то, какъ извѣстно изъ механики, при скорости v сопротивление $P = 3\pi \cdot a \cdot \rho \cdot v$ динамъ. Такъ какъ $v = u \cdot E$, то, слѣдовательно,

$$3\pi a \cdot \rho \cdot u = 1,564 \cdot 10^{-12},$$

откуда

$$a = \frac{1,564}{3\pi \cdot \rho \cdot u} \cdot 10^{-12} \text{ см.}$$

Величина ρ въ результатѣ тщательныхъ измѣреній оказывается равною $0,01055 \text{ C.-G.-S.}$ при 18° C . Вставляя это число и замѣняя π его значеніемъ $3,1416$, получаемъ

$$a = \frac{15,73}{u} \cdot 10^{-12} \text{ см.}$$

Если это вычисленіе правильно, то діаметръ іона калия составляетъ $2,35 \cdot 10^{-8} \text{ см.}$, а діаметръ іона натрія $3,48 \cdot 10^{-8} \text{ см.}$ Эти величины оказываются того же порядка, что и діаметры молекулъ вообще, лежащія большей частью между $2 \cdot 10^{-8}$ и $3 \cdot 10^{-8}$. Но формула, дающая сопротивление тренія, предполагаетъ, что діаметръ a разсматриваемаго шара великъ по сравненію съ молекулярными размѣрами; поэтому эти числа слѣдуетъ разсматривать лишь какъ приближенныя. Однако, изъ нихъ можно все же съ увѣренностью заключить, что величины іоновъ въ водныхъ растворахъ не слишкомъ сильно разнятся отъ величины молекулъ воды.

Было бы ошибочнымъ, однако, предполагать, что въ водномъ растворѣ іонъ обладаетъ простымъ строеніемъ, на примѣръ, представляетъ собою заряженный атомъ калия, атомъ натрія, атомъ хлора и т. п. Цѣлый рядъ фактовъ указываетъ на то, что, какъ и въ газахъ (§ 129), въ водныхъ растворахъ вокругъ элементарнаго іона скопляются нѣсколько нейтральныхъ молекулъ (молекулъ воды), образуя прочный комокъ. Одинъ изъ фактовъ, приводящихъ къ такому выводу, заключается въ слѣдующемъ. Если къ водному электролиту прибавить какого-либо индифферентнаго вещества (на примѣръ, алкоголя), то измѣненія концентрации, происходящія при прохожденіи электрическихъ зарядовъ, указываютъ, что при переносѣ іоновъ переносятся не только К, или Na, или Cl и т. п., но также и H₂O.

ЗАКОНЪ ДИССОЦІАЦИИ.

273. Если изложенная въ § 271 теорія диссоціаціи вѣрна, то слѣдуетъ ожидать, что въ электролитахъ дѣйствуетъ законъ диссоціаціи, подобный тому, который мы нашли въ § 127 для іонизированнаго газа. Положимъ, что η есть число граммъ-эквивалентовъ, растворенныхъ въ 1 куб. см., при чемъ изъ нихъ n находятся въ формѣ молекулъ и v — расщеплены на іоны. Очевидно, что $\eta = n + v$. Диссоціирующее дѣйствіе воды расщепляетъ въ одну секунду $q = pn$ молекулъ, гдѣ p — постоянный множитель, величина котораго служитъ мѣрою диссоціирующаго дѣйствія воды на данную соль. Если далѣе коэффициентъ рекомбинаціи іоновъ равенъ α , то, согласно § 127, въ одну секунду образуются вновь αv^2 молекулъ. Если явленіе диссоціаціи стационарно, т.-е. отношеніе числа диссоціированныхъ молекулъ къ числу недиссоціированныхъ постоянно, то должно соблюдаться равенство:

$$p \cdot n = \alpha \cdot v^2.$$

Положимъ $\frac{p}{\alpha} = c$; эту величину c обычно называютъ постоянной диссоціаціи. Въ такомъ случаѣ

$$\frac{v^2}{n} = c$$

или, такъ какъ $n = \eta - v$,

$$v^2 = c \cdot (\eta - v).$$

Были сдѣланы попытки провѣрить это уравненіе при помощи эквивалентной проводимости. Если Λ_0 есть предѣльное ея значеніе

для данного раствора соли, т.-е. эквивалентная проводимость при полной диссоціаціи, если, далѣе, λ — проводимость и ν — концентрація іоновъ, то $\lambda = \nu \cdot \Lambda_0$. Если, съ другой стороны, эквивалентная проводимость равна Λ_η и общая концентрація есть η , т.-е. $\Lambda_\eta = \frac{\lambda}{\eta}$, то $\lambda = \eta \cdot \Lambda_\eta$. Отсюда слѣдуетъ, что

$$\frac{\Lambda_\eta}{\Lambda_0} = \frac{\nu}{\eta}.$$

Отношеніе эквивалентной проводимости при концентраціи η къ предѣльной проводимости равно отношенію числа распавшихся на іоны молекулъ къ общему числу растворенныхъ молекулъ.

Если мы обозначимъ дробь $\frac{\nu}{\eta}$ посредствомъ одной буквы, положивъ

$$\frac{\nu}{\eta} = \frac{\Lambda_\eta}{\Lambda_0} = y,$$

и раздѣлимъ обѣ части уравненія диссоціаціи на η , то получимъ:

$$\eta \cdot y^2 = c \cdot (1 - y).$$

Эквивалентная проводимость Λ_η въ силу этого должна зависеть отъ концентраціи η по слѣдующему закону

$$\eta \cdot \Lambda_\eta^2 = C \cdot (\Lambda_0 - \Lambda_\eta),$$

гдѣ $C = c \cdot \Lambda_0$.

При повѣркѣ этой формулы обнаруживается ея примѣнимость ко всѣмъ электролитамъ, содержащимъ относительно мало іоновъ, напримѣръ, къ органическимъ кислотамъ и вообще къ очень слабо диссоціированнымъ органическимъ соединеніямъ, имѣющимъ характеръ солей. Иначе обстоитъ дѣло съ сильно диссоціированными неорганическими солями.

Для всѣхъ хорошо проводящихъ солей, дающихъ большое число іоновъ, измѣренія не подтверждаютъ теоретической формулы диссоціаціи.

Для иллюстраціи характера отклоненій отъ теоретической формулы дана на рис. 186 кривая, выражающая зависимость эквивалентной проводимости горькой соли (MgSO_4) отъ концентраціи η , согласно даннымъ таблицы § 270. Здѣсь же штрихами нанесена кривая, выражающая зависимость, которая получилась бы по закону диссоціаціи

изъ свойствъ весьма разбавленныхъ растворовъ для болѣе концентрированныхъ при томъ же значеніи Λ_0 . Мы видимъ, что вторая кривая, сначала совпадающая съ первою, вскорѣ спускается значительно ниже ея; слѣдовательно, измѣренная проводимость нѣсколько концентрированныхъ растворовъ значительно превышаетъ вычисленную по формулѣ диссоціаціи. Для нормальнаго раствора $MgSO_4$ отношеніе обѣихъ проводимостей приблизительно равняется 2,6.

Причина такого отклоненія электролитовъ, богатыхъ іонами, отъ теоретическаго закона, вѣроятно, связана съ образованіемъ ком-

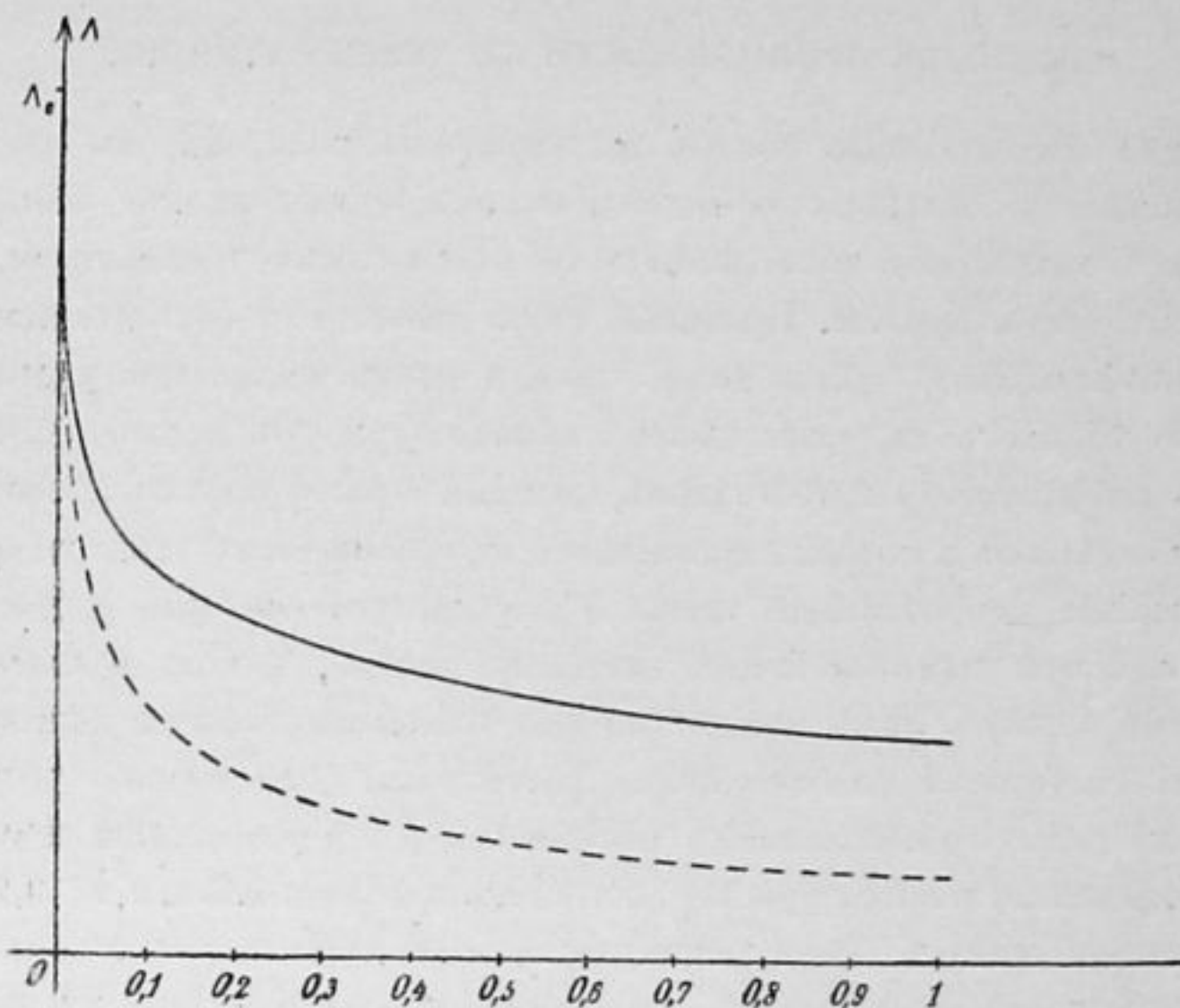


Рис. 186. Эквивалентная проводимость горькой соли ($MgSO_4$)

— — — — — измѣренная
 - - - - - вычисленная по формулѣ диссоціаціи.

ковъ, упомянутыхъ въ предыдущемъ параграфѣ. Когда іонъ образуется изъ молекулы, онъ, вѣроятно, представляетъ собою маленькую частичку, которая лишь постепенно нагружается водяными молекулами. Въ растворахъ, весьма богатыхъ іонами, въ весьма малый промежутокъ времени происходятъ какъ расщепленія, такъ и рекомбинаціи. Поэтому въ нихъ находится чрезвычайно много меньшихъ іоновъ, не нагруженныхъ водяными молекулами или слабо

ими нагруженныхъ. Маленькіе іоны, вѣроятно, имѣють меньшую склонность къ рекомбинаціи, нежели большія скопленія, т.-е. для нихъ постоянная c имѣеть большее значеніе. Кромѣ того, они, конечно, испытываютъ меньшее сопротивленіе тренія, такъ что и Λ_0 для нихъ больше. вмѣстѣ съ тѣмъ въ изслѣдуемой формулѣ величина $C = c \Lambda_0$ не является постоянной, но замѣтно возрастаетъ съ увеличеніемъ η . Такимъ образомъ объясняется противорѣчіе между теоріей и опытомъ. Однако, въ настоящее время еще нельзя утверждать, чтобы этотъ вопросъ былъ окончательно разрѣшенъ.

ИЗМѢНЕНІЕ ПРОВОДИМОСТИ СЪ ТЕМПЕРАТУРОЮ.

274. Разбавленные водные растворы электролитовъ, въ противоположность большинству металлическихъ проводниковъ, обнаруживаютъ возрастаніе проводимости съ повышеніемъ температуры, и притомъ очень сильное. Причиной этого является то обстоятельство, что коэффициентъ тренія воды, какъ и всѣхъ жидкостей вообще, сильно убываетъ съ возрастаніемъ температуры, въ противоположность коэффициенту тренія газовъ, который играетъ роль въ проводимости металловъ и который возрастаетъ съ повышеніемъ температуры. Уменьшеніе сопротивленія тренія и обусловливаемое имъ возрастаніе скоростей переноса іоновъ настолько велики, что по сравненію съ ними имѣють лишь малое значеніе измѣненія степени диссоціаціи въ достаточно разбавленныхъ растворахъ. Для хорошо проводящихъ сильно разбавленныхъ растворовъ солей возрастаніе проводимости вблизи температуры 18° достигаетъ приблизительно $2,4 - 2,7\%$ на каждый градусъ. Уменьшеніе тренія воды достигаетъ $2,5\%$ на 1° . Температурный коэффициентъ проводимости электролитовъ нѣсколько отстаетъ отъ этого числа въ ту или другую сторону; это обстоятельство зависитъ, вѣроятно, отъ того, что съ температурой нѣсколько измѣняется величина тѣхъ молекулярныхъ скопленій, которыя функционируютъ въ качествѣ іоновъ.

ТЕОРІЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХЪ ЦѢПЕЙ.

275. При соприкосновеніи металлической пластинки и электролита, у поверхности соприкосновенія образуется двойной электрической слой (рис. 22 на стр. 64 первой части), напряженіе котораго равняется напряженію при соприкосновеніи металла и электролита. Нернстѣ

развилъ нижеслѣдующую теорію образованія этого двойного слоя. Положительные іоны металла, находящіеся, какъ мы знаемъ, и въ твердомъ металлѣ, имѣютъ извѣстное стремленіе къ растворенію въ водѣ, подобно молекуламъ любого растворимаго тѣла. Это стремленіе находится въ зависимости отъ двухъ факторовъ: оно тѣмъ сильнѣе, чѣмъ больше „упругость растворенія“ растворимаго тѣла, и оно тѣмъ слабѣе, чѣмъ большее количество растворенныхъ частицъ уже находится въ водѣ, т.-е. чѣмъ выше концентрація раствора. Если, какъ при обычномъ процессѣ растворенія, незаряженныя молекулы переходятъ въ воду, то этотъ процессъ длится до тѣхъ поръ, пока концентрація раствора не придетъ въ равновѣсіе съ упругостью растворенія. Но иначе обстоитъ дѣло при раствореніи іоновъ, такъ какъ при этомъ водный растворъ заряжается положительно, а металлъ отрицательно. Такъ какъ и растворъ и металлъ являются проводниками, то при раствореніи іоновъ между ними устанавливается постоянное напряженіе, и, слѣдовательно, въ мѣстахъ ихъ соприкосновенія образуется двойной электрической слой, толщина котораго равна разстоянію молекулъ металла отъ молекулъ воды. Такъ какъ металлъ заряженъ отрицательно, а растворъ положительно, то іоны испытываютъ въ полѣ двойного слоя силовое дѣйствіе, направленное къ металлу. Вслѣдствіе большой величины заряда іона это силовое дѣйствіе возрастаетъ, послѣ перехода въ растворъ даже ничтожнаго по вѣсу количества іоновъ, настолько значительно, что имъ уравновѣшивается стремленіе къ дальнѣйшему растворенію. Напряженіе двойного слоя, т.-е. напряженіе при соприкосновеніи металла съ электролитомъ, даетъ, такимъ образомъ, мѣру стремленія металлическихъ іоновъ къ растворенію. Оно тѣмъ больше, чѣмъ меньше металлическихъ іоновъ растворено въ водѣ; у болѣе концентрированныхъ растворовъ оно уменьшается и становится равнымъ нулю, когда степень концентраціи металлическихъ іоновъ въ водѣ какъ разъ соотвѣтствуетъ упругости растворенія, т.-е. когда стремленіе металла испускать въ растворъ новые іоны равно нулю. Если сдѣлать растворъ настолько концентрированнымъ, чтобы онъ сталъ пересыщеннымъ по сравненію съ упругостью растворенія металла, то положительные іоны осаждаются на металлѣ и образуется двойной слой съ обратнымъ напряженіемъ: металлъ заряженъ положительно, а растворъ отрицательно. Силовое дѣйствіе поля этого двойного слоя, послѣ того, какъ осадится небольшое количество іоновъ, ста-

новится настолько значительнымъ, что оно препятствуетъ дальнѣйшему развитію процесса; поэтому напряженіе при соприкосновеніи является въ этомъ случаѣ мѣрою стремленія іоновъ къ осажденію изъ раствора. Первый случай (металль заряженъ отрицательно, растворъ положительно) имѣетъ мѣсто преимущественно тогда, когда металль обладаетъ очень большою упругостью растворенія. Всѣ неблагородные, легко окисляющіеся металлы — цинкъ, свинець, кадмій и т. д. — отличаются большою упругостью растворенія и заряжаются даже въ значительно концентрированныхъ растворахъ отрицательно, т.-е. образуютъ отрицательный полюсъ гальванической цѣпи. Наоборотъ, благородные металлы — мѣдь, серебро, ртуть — имѣютъ по большей части столь малую упругость растворенія, что даже въ разбавленныхъ растворахъ они заряжаются положительно, т.-е. образуютъ положительный полюсъ въ цѣпи. Перекиси также заключаютъ въ себѣ трудно растворимые положительные іоны. Если мы беремъ отъ гальванической цѣпи токъ, то мы непрерывно отнимаемъ отъ двойныхъ слоевъ ихъ заряды, и вслѣдствіе этого снова начинаются задержанные ими процессы растворенія и выдѣленія іоновъ, которые продолжаются все время, пока отъ цѣпи берутъ токъ. Такимъ образомъ въ элементѣ Даніеля растворяется цинкъ и выдѣляется мѣдь. Химическія силы, вызывающія раствореніе и выдѣленіе, влекутъ іоны по направленію, противоположному силовому дѣйствию электрическаго поля двойныхъ слоевъ, и такимъ образомъ непрерывно доставляютъ энергію эѳиру, которую послѣдній переноситъ по цѣпи тока и распредѣляетъ по проводникамъ, составляющимъ цѣпь.

Кромѣ напряженій въ мѣстахъ соприкосновенія металла и электролита, доставляющихъ въ гальваническихъ цѣпяхъ главную часть всего напряженія между зажимами цѣпи, несомнѣнно образуются еще болѣе слабые электрическіе двойные слои въ мѣстахъ соприкосновенія различныхъ растворовъ, на примѣръ, въ элементѣ Даніеля на поверхности соприкосновенія растворовъ цинковаго и мѣднаго купоросовъ внутри стѣнки глинянаго цилиндра. Іоны диффундируютъ въ воду подобно раствореннымъ молекуламъ; при этомъ положительные и отрицательные іоны могутъ обладать различными скоростями диффузіи. Вслѣдствіе этого оба соприкасающіеся раствора получаютъ заряды противоположныхъ знаковъ, и въ переходномъ между жидкостями слоеъ возникаетъ электрическое поле. Это поле

имѣть такое направленіе, что его силовыя дѣйствія противоположны силовымъ дѣйствіямъ, вызваннымъ разностью скоростей диффузій; вслѣдствіе большой величины заряда іона, это поле весьма скоро вполнѣ компенсируетъ разницу въ скоростяхъ диффузій. Съ этого момента диффузія черезъ пограничный слой становится стационарнымъ процессомъ, и оба раствора имѣютъ постоянное напряженіе при соприкосновеніи.

ТЕПЛОВОЕ ДѢЙСТВІЕ ТОКА.

276. Когда въ проводникѣ происходитъ электрической разрядъ, проводникъ нагрѣвается; въ § 102 мы видѣли, какъ можно измѣрить энергію, выдѣляющуюся въ проводникѣ въ видѣ теплоты. Теперь мы можемъ дать отвѣтъ на вопросъ о томъ, какимъ путемъ эта энергія попадаетъ въ проводникъ.

Очевидно, что при этомъ энергія непрерывно почерпается изъ того источника электричества (напримѣръ, батареи аккумуляторовъ), отъ котораго мы беремъ токъ. Тѣ части проводника, въ которыхъ энергія обнаруживается въ видѣ теплоты тока, могутъ находиться на значительномъ разстояніи отъ источника электричества; такимъ образомъ, электрической токъ связанъ съ переносомъ энергіи на произвольныя разстоянія. Средою, переносящею энергію, можетъ быть, конечно, лишь эфиръ, такъ какъ въ немъ происходятъ процессы, поддерживающіе токъ электрически заряженныхъ частицъ въ проводникѣ. Эти процессы въ эфирѣ проявляются, какъ электрическое и магнитное поля вокругъ проводника съ токомъ, и переносимый эффектъ поэтому опредѣляется вмѣстѣ силою электрическаго и магнитнаго полей.

Можно поставить себѣ, напримѣръ, такую задачу: измѣрить энергію, переносимую въ электрическую лампу накаливанія, за то время, когда она горитъ. Для этого мы должны сначала измѣрить электрическое напряженіе между обоими зажимами, ведущими къ угольной нити лампы; это дѣлается путемъ приключенія вольтметра къ этимъ двумъ точкамъ. Затѣмъ мы должны измѣрить полную величину магнитнаго поля вокругъ проводника съ токомъ, для чего служитъ амперметръ, введенный въ проводъ. Совершенно такимъ же образомъ мы измѣряли въ § 102 энергію, передаваемую проволоку черезъ эфиръ, и превращающуюся въ ней въ теплоту; разница лишь та, что тамъ

мы вмѣсто амперметра пользовались кулонметромъ (рис. 69 на стр. 173 первой части). Если напряженіе между концами проводника равняется V вольтамъ и количество электричества, прошедшее черезъ проводникъ, равняется M кулонамъ, то энергія равняется $W = MV$ джулямъ ($4,19$ джулей $= 1$ малой калоріи). Если промежутокъ времени, за который перенесена энергія W , равняется t секундамъ, то мощность или напряженіе потока энергіи равняется $U = \frac{W}{t}$ джулямъ въ секунду. Съ другой стороны, полная величина магнитнаго поля вокругъ проводника съ токомъ равняется $J = \frac{M}{t}$ амперъ-витковъ. Такимъ образомъ $U = VJ$. Такъ какъ единица мощности (джуль въ секунду) называется ваттомъ, то содержаніе этого равенства можно выразить слѣдующимъ образомъ:

Потокъ энергіи, или мощность, вызываемый эфиромъ въ какомъ-либо электрическомъ аппаратѣ, равенъ произведенію изъ электрическаго напряженія между зажимами аппарата и силы тока, т.-е. полной величины магнитнаго поля вокругъ проводника съ токомъ. Если электрическое напряженіе измѣряется вольтами, а полная величина магнитнаго поля (или сила тока) амперами, то мощность выразится въ ваттахъ; 1 ваттъ равенъ 1 джулю въ секунду.

Если, напримѣръ, напряженіе между зажимами лампы накаливанія равняется 110 вольтамъ, а сила тока 0,9 ампера, то лампа потребляетъ 99 ваттъ, т.-е. около 0,1 киловатта. Такая мощность соотвѣтствуетъ силѣ свѣта приблизительно въ 32 свѣчи.

Въ электротехникѣ при измѣреніяхъ обычно пользуются киловаттомъ. Такъ какъ 1 джуль $= 0,102$ килограммъ-метра, то 1 киловаттъ равенъ 102 килограммъ-метрамъ въ секунду. Въ механикѣ за единицу мощности принимается лошадиная сила, сокращенно обозначаемая черезъ PS ¹⁾ и равная 75 килограммъ-метрамъ въ секунду. Такимъ образомъ,

$$1 \text{ киловаттъ} = 1,36 \text{ } PS;$$

$$1 \text{ } PS = 0,736 \text{ киловатта.}$$

Производной отъ киловатта является упомянутая въ § 102 крупная техническая единица энергіи — киловаттъ-часъ: 1 киловаттъ-часъ равенъ 3 600 000 джулей (такъ какъ джуль равенъ 1 ваттъ-секундѣ).

¹⁾ Сокращеніе нѣмецкаго *Pferdestärke*; чаще употребляется обозначеніе *HP* — сокращеніе англійскаго *Horsepower*.

ТЕХНИЧЕСКІЯ ПРИМѢНЕНІЯ ТЕПЛОВОГО ДѢЙСТВІЯ ТОКА.

277. Важнѣйшимъ техническимъ примѣненіемъ нагрѣванія, сопровождающаго прохожденіе тока въ проводникѣ, является электрическое освѣщеніе. Существуютъ два принципиально различныхъ метода полученія электрическаго свѣта. Первый состоитъ въ использовании электрическаго дугового разряда. Для этой цѣли употребляются дуговые лампы, важнѣйшіе типы которыхъ были описаны въ главѣ IX первой части. Всѣ дуговые лампы имѣютъ очень большую силу свѣта и потому употребляются только въ тѣхъ случаяхъ, когда приходится освѣщать большія пространства. Второй методъ полученія электри-

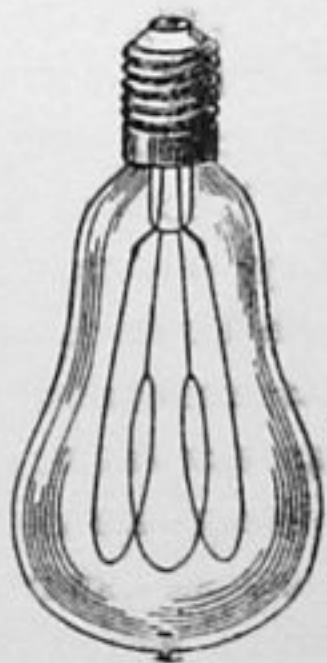


Рис. 187. Лампа съ угольной нитью.



Рис. 188. Танталовая лампа.

ческаго свѣта состоитъ въ томъ, что теплотою тока накаливается добѣла твердый проводникъ, имѣющій большое сопротивленіе. На этомъ принципѣ основано устройство лампъ накаливанія, примѣняющихся преимущественно въ тѣхъ случаяхъ, когда нельзя пользоваться чрезмѣрно большой силой свѣта дуговыхъ лампъ, напримѣръ, въ квартирахъ. Старѣйшей лампой накаливанія является лампа съ угольной нитью, изобрѣтенная Эдисономъ (Edison)¹⁾. Эта лампа обладаетъ многими достоинствами, но имѣетъ тотъ большой недостатокъ, что расходуемая ею энергія весьма велика сравнительно съ ея свѣтосилою, почему ея свѣтъ весьма дорогъ (рис. 187). Угольная нить не должна нагрѣваться до слишкомъ высокой тем-

¹⁾ Еще раньше была изобрѣтена основанная на томъ же принципѣ лампа Ладыгина.

пературы, такъ какъ иначе она размягчается и легко перегараетъ въ наименѣе прочномъ мѣстѣ. Но чѣмъ ниже температура раскаленнаго тѣла, тѣмъ бѣольшая часть испускаемыхъ имъ лучей лежитъ въ инфракрасной области, къ которой нашъ глазъ не чувствителенъ. Процентное содержаніе видимыхъ лучей быстро возрастаетъ съ повышеніемъ температуры, и поэтому полезная работа источника свѣта существенно зависитъ отъ его температуры (ср. § 181). Вслѣдствіе этого въ послѣднее время стали замѣнять угольные нити лампъ накаливанія такими веществами, которыя выдерживаютъ накаливаніе до болѣе высокихъ температуръ. Первымъ образцомъ такой лампы является лампа Нернста, въ которой накаливается стержень изъ магnezіи. Однако, надежды, сначала возлагавшіяся на лампу Нернста, не оправдались, такъ какъ она обладаетъ одною весьма неприятною особенностью: какъ подробно описано въ § 121, она крайне чувствительна къ колебаніямъ напряженія. Въ послѣднее время лампы Нернста выдѣлываются въ весьма маломъ количествѣ. Повидимому, онѣ пригодны преимущественно въ тѣхъ случаяхъ, когда желательно получить очень большую силу свѣта. Въ новѣйшихъ лампахъ накаливанія примѣняется металлическая нить; таковы осрамовыя лампы, танталовыя лампы (рис. 188) и т. д. Тонкія металлическія нити, которыя накаливаются въ этихъ лампахъ, могутъ выдержать нагрѣваніе до весьма высокихъ температуръ, не расплавляясь. Поэтому такія лампы горятъ весьма экономно. Кромѣ того, по сравненію съ лампами съ угольною нитью онѣ имѣютъ еще то преимущество, что ихъ сопротивленіе возрастаетъ съ повышеніемъ температуры, тогда какъ сопротивленіе угля убываетъ при повышеніи температуры. Поэтому, въ противоположность лампъ Нернста, лампы съ металлическою нитью весьма мало чувствительны къ колебаніямъ напряженія — менѣе, чѣмъ лампы съ угольною нитью. Недостаткомъ ихъ является то обстоятельство, что весьма тонкія металлическія нити, размягчаясь въ раскаленномъ состояніи, легко разрываются отъ механическихъ сотрясеній; поэтому такія лампы нельзя толкать. Въ особенности это относится къ осрамовымъ лампамъ.

Нижеслѣдующая таблица даетъ понятіе о свѣтовой полезности электрическихъ лампъ. Въ ней дано число ваттъ, расходуемыхъ лампою на 1 свѣчу:

лампа съ угольною нитью	2,8 — 4	ваттъ
лампа Нернста	2,0	„

танталовая лампа	1,6	ваттъ
осрамовая лампа	1,1	"
угольная дуговая лампа	1,0 — 1,4	"
пламенная дуговая лампа	0,4 — 0,6	"

За исключеніемъ магнезіеваго стержня лампы Нериста, который накаливается, какъ и угли обыкновенныхъ дуговыхъ лампъ, прямо на воздухѣ, нити лампъ накаливанія помѣщаются въ стеклянный сосудъ, возможно лучше эвакуированный. Благодаря этому отъ накаленныхъ нитей отнимается черезъ теплопроводность лишь небольшая доля энергіи, и почти вся мощность затрачивается на лучеиспусканіе. Какъ уже было указано выше, изъ этихъ лучей лишь небольшая часть приходится на видимый свѣтъ.

278. Многочисленны также и непосредственныя примѣненія тепловаго дѣйствія электрическаго тока. Изъ многихъ примѣровъ упомянемъ здѣсь лишь электрическіе кухонные аппараты, существующіе въ продажѣ. Они представляютъ собою сосуды съ двойными стѣнками, между которыми расположены катушки очень хорошо изолированной тонкой проволоки или вообще какіе-либо металлическіе проводники съ большимъ сопротивленіемъ. Само собою разумѣется, что нагрѣваніе токомъ обходится сравнительно дорого, такъ какъ электрическая энергія представляетъ собою гораздо болѣе благородную форму энергіи, нежели теплота.

Особенно важнымъ примѣненіемъ нагрѣванія токомъ являются предохранители, которые при „короткомъ замыканіи“ предотвращаютъ возрастаніе силы тока въ проводѣ до опасныхъ размѣровъ. Подъ короткимъ замыканіемъ понимается вызванное несчастной случайностью соединеніе двухъ проводовъ, находящихся при постоянномъ напряженіи, проводникомъ весьма малаго сопротивленія. Въ такомъ случаѣ можетъ получиться настолько сильный токъ, что будутъ повреждены машины, аккумуляторы или измѣрительные инструменты; иногда теплота такого тока можетъ вызвать даже пожаръ. Эта опасность и предотвращается включеніемъ предохранителей. Они представляютъ собою короткія тонкія проволоки съ относительно большимъ сопротивленіемъ, изготовленныя изъ достаточно легкоплавкаго металла. Токъ нагрѣваетъ эти проволоки до высокой температуры, при чемъ, вслѣдствіе ихъ незначительныхъ размѣровъ, на это тратится лишь нѣсколько процентовъ всей переносимой энергіи. Если происходитъ короткое замыканіе, то сила тока можетъ воз-

расти лишь до определенного максимального значения, при котором еще нет опасности, но предохранитель нагревается уже до температуры плавления. Предохранитель расплавляется, и ток моментально прерывается; при этом вместо ценных электрических аппаратов гибнет лишь дешевый предохранитель, который легко заменить новым, и опасность пожара вполне устраняется.

ТЕПЛОВЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ.

279. Тепловым действием тока пользуются также для измерения силы тока и напряжений. Измеряемый ток при этом пропускается через тонкую „тепловую проволоку“, к средине которой

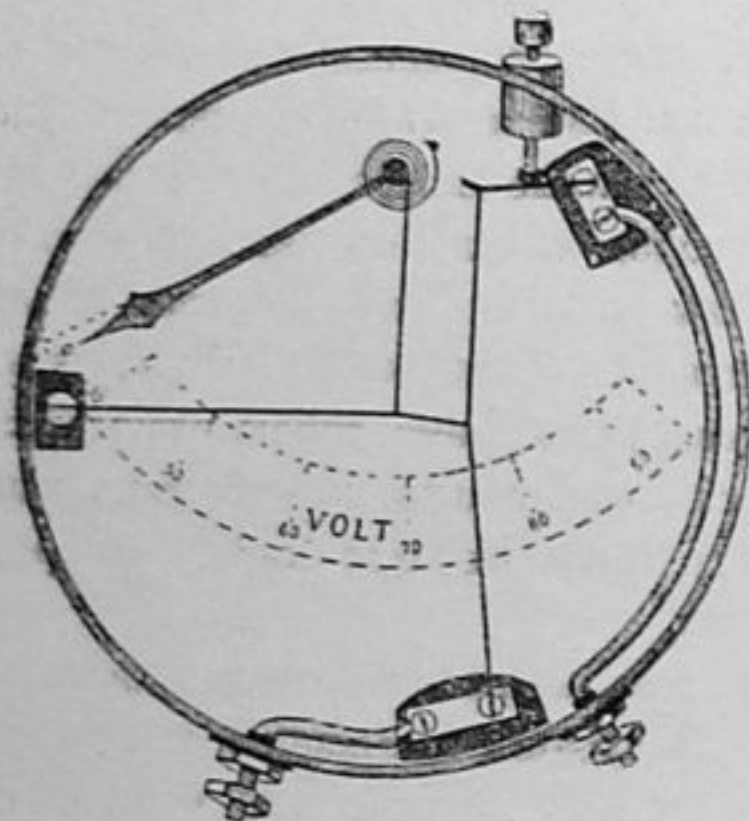


Рис. 189. Тепловой инструментъ.

припаяна другая проволока, которая при помощи часовой пружины оттягивает первую перпендикулярно к ее длине (рис. 189). Тепловая проволока, нагреваясь при прохождении тока, расширяется; вследствие этого часовая пружина сжимается и тем сильнее, чем сильнее ток в тепловой проволоке. Движение пружины передается стрелке, движущейся по шкале. Тепловые инструменты собственно принадлежат к числу измерителей тока, но их можно, подобно гальванометрам, при-

менять также и в качестве вольтметровъ. Изображенный на рис. 189 тепловой инструментъ представляет собою тепловой вольтметръ.

Тепловые инструменты, какъ и инструменты съ мягкимъ желѣзомъ (§ 241), даютъ отклоненія всегда въ одну сторону, независимо отъ направленія тока; при большихъ силахъ тока ихъ отклоненія возрастаютъ быстрее, нежели при слабыхъ токахъ.

ТЕОРЕМА ПОЙНТИНГА О ПЕРЕНОСѢ ЭНЕРГИИ ВЪ ЭЛЕКТРО-МАГНИТНОМЪ ПОЛѢ.

280. Мы обратили особое вниманіе на случай превращенія въ теплоту энергіи, переносимой черезъ эфиръ изъ источника электричества въ проводники, чтобы имѣть возможность основываться на

указанныхъ въ § 102 измѣреніяхъ. Понятно само собою, что переносъ энергіи обусловливается лишь происходящими въ эфирѣ процессами, совершенно независимо отъ того, что въ заключеніе изъ этой энергіи получается. Поэтому въ предложеніи, формулированномъ нами въ § 276, ничего не говорится о конечномъ результатѣ переноса энергіи. Для большей опредѣленности мы въ послѣдующихъ разсужденіяхъ представимъ себѣ обычную параллельную проводку, вдоль которой энергія переносится отъ электрической станціи къ потребителямъ. Проведемъ мысленно въ какомъ-либо мѣстѣ плоскость, перпендикулярную къ проводкѣ. Этимъ мы раздѣлимъ пространство на двѣ области: въ области, лежащей передъ сѣченіемъ, находится электрическая станція, а въ области за сѣченіемъ находятся потребители; энергія, такимъ образомъ, должна проходить черезъ это сѣченіе. Если электрическое напряженіе между обѣими проволоками въ томъ мѣстѣ, гдѣ мысленно проводится сѣченіе, равняется V вольтъ, а полная величина магнитнаго поля равна J амперамъ, то весь потокъ энергіи, проходящій черезъ сѣченіе, равняется $U = VJ$ ваттъ. При помощи этой формулы можно изобразить распределеніе потока энергіи по отдѣльнымъ частямъ сѣченія. Проведемъ въ нашей плоскости нѣсколько магнитныхъ силовыхъ линій; онѣ раздѣлятъ плоскость на n кольцевыхъ полосъ. Каждую такую полосу мы раздѣлимъ на m частей, имѣющихъ по одинаковому числу амперъ-витковъ $Q = \frac{J}{m}$. Если при этомъ дѣленіи мы будемъ въ каждомъ кольцѣ исходить изъ точекъ той прямой, которая соединяетъ центры поперечныхъ сѣченій обѣихъ проволокъ, то всѣ точки дѣленія будутъ лежать на кривыхъ, идущихъ отъ поверхности одной проволоки къ поверхности другой и пересѣкающихъ силовыя линіи магнитнаго поля повсюду подъ прямымъ угломъ (рис. 190). Эти кривыя мы будемъ называть „магнитными эквипотенціальными кривыми“. Такимъ образомъ вся плоскость раздѣляется на nm криволинейныхъ прямоугольныхъ областей. Изъ нихъ четыре простираются въ безконечность, но, если числа n и m достаточно велики, то можно пренебречь 4 по сравненію съ nm и принимать во вниманіе лишь небольшія области, лежащія вблизи проводовъ. Вычислимъ мощность, проходящую черезъ одну такую, мысленно изолированную область. Чтобы предварительно выдѣлить кольцевую полосу, къ которой принадлежитъ наша область, нужно мысленно

построить кольцеобразный замкнутый соленоид (§ 248), витки котораго проходили бы черезъ плоскость какъ разъ въ точкахъ обѣихъ кривыхъ, ограничивающихъ кольцевую полосу. По виткамъ соленоида идетъ токъ и при томъ такъ, что на каждый небольшой прямоугольникъ, на которые раздѣлена полоса, приходится Q амперь-

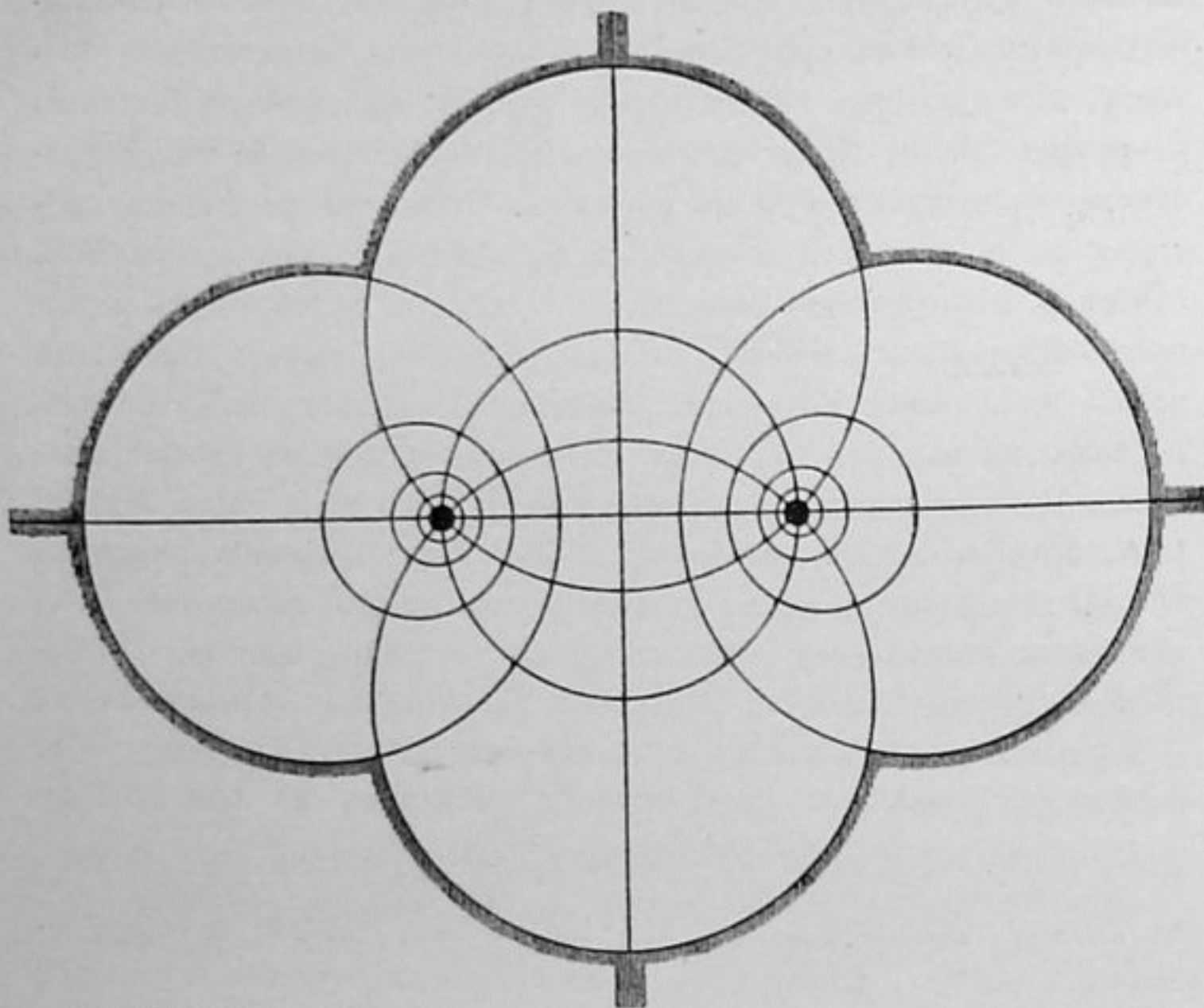


Рис. 190. Распредѣленіе потока энергіи по поперечному сѣченію параллельныхъ проводовъ. $n = 10$, $m = 8$.

витковъ. Поле соленоида только въ томъ случаѣ переноситъ энергію черезъ плоскость рисунка, если между обѣими кривыми, ограничивающими кольцевую полосу, имѣется электрическое напряженіе P . Мы можемъ представить себѣ это такимъ образомъ, что передъ плоскостью полосы въ каждый витокъ соленоида включенъ источникъ электричества напряженія P , а позади плоскости въ каждомъ виткѣ помѣщено сопротивленіе, поглощающее всю доставляемую источникомъ энергію послѣ ея прохожденія черезъ плоскость. Если мы теперь обратимся къ формулѣ $U = VJ$, то найдемъ, что мощность, переносимая черезъ отдѣльную область, равняется PQ ваттамъ.

Величина P соотвѣтствуетъ только одной слагающей электрическаго поля, перпендикулярной къ направленію оси соленоида. Мы находимъ такимъ образомъ, что потокъ энергіи сквозь мысленно изолированный прямоугольникъ вычисляется по тому же правилу, что и для всей плоскости сѣченія, и равенъ произведенію полныхъ величинъ электрическаго и магнитнаго полей въ этомъ прямоугольникѣ. Такъ какъ переносъ энергіи является функцией эвирныхъ процессовъ въ каждомъ отдѣльномъ мѣстѣ, то мощность переносится черезъ малый прямоугольникъ, согласно этому закону, также и въ томъ случаѣ, когда этотъ прямоугольникъ является частью болѣе обширнаго поля параллельныхъ проводовъ. Мощность, переносимая черезъ полосу, ограниченную двумя сосѣдними эквипотенціальными кривыми, вычисляется слѣдующимъ образомъ. Если электрическія напряженія въ отдѣльныхъ прямоугольникахъ, составляющихъ эту полосу, равны P_1, P_2, \dots, P_n , то искомая мощность равняется $Q \cdot P_1 + Q \cdot P_2 + \dots + Q \cdot P_n = Q \cdot V$, гдѣ $V = P_1 + P_2 + \dots + P_n$, т.-е. представляетъ собою полное электрическое напряженіе между поверхностями проволокъ. Такая же самая величина получается для каждой полосы, а такъ какъ число всѣхъ полосъ равно m , то сумма потоковъ энергіи, переносимыхъ черезъ mt прямоугольниковъ, равняется $m \cdot Q \cdot V = J \cdot V$, т.-е. дѣйствительно равняется всему потоку энергіи, проходящему черезъ плоскость.

Формула, доказанная нами сейчасъ для малой прямоугольной области, имѣетъ вполнѣ общее значеніе; мы можемъ поэтому высказать слѣдующую теорему, впервые найденную Пойнтингомъ (Poynting):

Въ области, гдѣ протекаютъ электромагнитные процессы, благодаря соединенному дѣйствию электрическихъ напряженій и магнитнаго поля, происходитъ переносъ энергіи въ направленіи, перпендикулярномъ какъ къ магнитному, такъ и къ электрическому полю. Потокъ энергіи U черезъ небольшую прямоугольную полосу, границы которой соотвѣтственно параллельны и перпендикулярны магнитнымъ силовымъ линіямъ, равенъ произведенію изъ числа Q амперъ-витковъ полосы и электрическаго напряженія P вдоль протяженія полосы, перпендикулярнаго къ магнитному полю, т.-е. $U = P \cdot Q$.

Потокъ энергіи направлень въ ту сторону, въ которую нужно

смотримъ, чтобы уголъ отъ направленія электрическаго поля къ направленію магнитнаго, описываемый слѣва направо (по часовой стрѣлкѣ), былъ меньше двухъ прямыхъ (рис. 191).

Какъ мы видѣли, потокъ энергіи въ параллельныхъ проводахъ, подобно ихъ магнитному и электрическому полямъ, ограничивается ближайшей окрестностью проводовъ, если не принимать во вниманіе бесконечно малыхъ дѣйствій. Потокъ энергіи несется вплотную по обоимъ проводамъ, какъ по рельсамъ, слѣдуя за всѣми искривленіями и заворотами проволокъ. Представимъ себѣ въ нѣкоторомъ



Рис. 191. Направленіе переноса энергіи въ эфирѣ.

мѣстѣ второе сѣченіе, болѣе удаленное отъ электрической станціи, нежели первое. Пусть напряженіе въ этомъ мѣстѣ будетъ V_1 . Вслѣдствіе потери напряженія, V_1 нѣсколько меньше, чѣмъ V , и, слѣдовательно, переносимая черезъ это сѣченіе мощность $U_1 = V_1 \cdot J$ также нѣсколько меньше, чѣмъ U . Потерянная мощность $U - U_1 = (V - V_1) \cdot J$ осталась на пути въ проводахъ въ формѣ теплоты тока. Эта потеря соотвѣтствуетъ слагающей электрическаго поля, параллельной проводамъ, которая вслѣдствіе омическаго сопротивленія проводовъ слагается съ нормальнымъ полемъ между обѣими проволоками (при хорошихъ проводникахъ послѣднее поле значительно превосходитъ первое). Если сопротивленіе проводки между обоими сѣченіями равно R омамъ, то потеря напряженія, согласно § 261, равняется $V - V_1 = R \cdot J$, и потеря мощности будетъ $U - U_1 = R \cdot J^2$.

ПРИМѢРЫ ПЕРЕНОСА ЭНЕРГІИ.

281. Въ проводникѣ съ большимъ сопротивленіемъ, на примѣръ, въ нити лампы накаливанія, преобладаетъ слагающая электрическаго поля, параллельная направленію проводника. Изъ теоремы Пойнтинга слѣдуетъ, что въ такихъ проводникахъ энергія переносится почти

перпендикулярно къ ихъ длинѣ. Внутри проводника также имѣются электрическое поле и магнитное поле, которое распредѣляетъ поступающую энергію равномерно по всей внутренности проводника, гдѣ она расходуется и превращается въ теплоту.

Если электрической токъ проходитъ черезъ двойной электрической слой въ направленіи поля этого слоя, то, по теоремѣ Пойнтинга, энергія вступаетъ снаружи въ узкій слой, какъ въ щель, и распредѣляется здѣсь, распространяясь по линіямъ, идущимъ въ плоскости двойного слоя. Если этотъ двойной слой образованъ между металломъ и электролитомъ, то энергія тратится на происходящія въ слоѣ химическія превращенія. Если электрической токъ идетъ въ обратномъ направленіи, то химическія превращенія доставляютъ энергію; эта послѣдняя вытекаетъ изъ узкой щели двойного слоя въ свободное пространство и затѣмъ переносится къ болѣе отдаленнымъ частямъ проводки. Первый случай мы имѣемъ при зарядѣ аккумуляторовъ, второй — при ихъ разрядѣ. Если напряженіе двойного слоя равняется V_1 и сила тока равна J , то мощность, вступающая въ двойной слой или изъ него выходящая, равняется $V_1 \cdot J$. Если имѣется нѣсколько двойныхъ слоевъ, включенныхъ послѣдовательно одинъ за другимъ, и сумма всѣхъ напряженій равна V , то вся вступающая въ нихъ или изъ нихъ выходящая мощность равняется $V \cdot J$.

Третьимъ примѣромъ можетъ служить электрической двигатель, съ которымъ обстоятельнѣе мы познакомимся въ главѣ VII. На обмоткѣ вращающейся части — „якоря“ — электрическое поле слагается изъ омическаго напряженія V' и такъ называемыхъ индуктированныхъ напряженій V'' ; эти послѣднія преобладаютъ и располагаются параллельно поверхности проводника. Энергія втекаетъ, какъ и въ лампѣ накаливанія, извнѣ въ обмотку якоря приблизительно перпендикулярно къ проволокамъ, при чемъ лишь малая ея часть ($U' = V' \cdot J$) превращается въ теплоту. Бóльшая часть мощности ($U'' = V'' \cdot J$) проявляется снова въ видѣ работы, которая можетъ быть снята съ вала мотора.

Переносимая электромагнитными процессами энергія можетъ также скопиться и въ самомъ эфирѣ въ формѣ электрической (или магнитной) энергіи. Представимъ себѣ, на примѣръ, конденсаторъ съ очень высокой емкостью, пластины котораго соединены черезъ большое сопротивленіе съ полюсами гальванической батареи. Пока конденсаторъ заряжается, въ подводящихъ проводахъ течетъ электрической

токъ, и вдоль нихъ, по теоремѣ Пойнтинга, переносится энергія, проникающая въ діэлектрикъ конденсатора (подобно тому, какъ она проникаетъ въ двойные слои заряжаемаго аккумулятора). Здѣсь энергія распредѣляется равномерно по всему электрическому полю. Если сила заряжающаго тока (непрерывно убывающая) въ очень короткій промежутокъ времени τ составляетъ въ среднемъ J и напряженіе конденсатора (непрерывно возрастающее) въ это время равно въ среднемъ V' , то за промежутокъ времени τ въ діэлектрикъ вступаетъ энергія $V' \cdot J \cdot \tau$. Если напряженіе батареи равняется V , то доставляемая ею за это время энергія равняется $V \cdot J \cdot \tau$; разность $(V - V') \cdot J \cdot \tau$ превращается въ теплоту тока въ проводахъ. Для полного заряженія конденсатора до напряженія V , онъ долженъ, какъ доказано въ § 83, получить энергію, равную $\frac{1}{2} V \cdot M$ джулямъ, если M —его зарядъ. Но батарея доставила $V \cdot M$ джулей; слѣдовательно, половина этого количества, т.-е. $\frac{1}{2} V \cdot M$ джулей, превращается въ теплоту тока въ проводахъ. Такъ обстоитъ дѣло, если включено большое сопротивленіе. Если же его нѣтъ, то энергія $\frac{1}{2} M \cdot V$ отчасти тратится на образованіе электрическихъ колебаній въ эфирѣ, о которыхъ мы поговоримъ подробнѣе въ главѣ VIII.

Движущееся электрически заряженное тѣло, какъ мы видѣли въ § 251, окружено магнитнымъ полемъ. Это послѣднее вмѣстѣ съ электрическимъ полемъ, которое возбуждено тѣломъ, производитъ переносъ энергіи, при чемъ въ этомъ случаѣ переносится изъ одного мѣста пространства въ другое энергія самаго электрическаго поля, движущагося вмѣстѣ съ тѣломъ.

МЕХАНИЧЕСКАЯ АНАЛОГІЯ ПЕРЕНОСА МОЩНОСТИ ВЪ ЭФИРѢ.

282. Механическимъ способомъ можно переносить мощность только въ томъ случаѣ, если въ механизмѣ, обслуживающемъ этотъ переносъ, процессъ движенія связанъ съ силами, т.-е. съ упругими напряженіями. Величина мощности въ этомъ случаѣ равна произведенію изъ полного напряженія на скорость движенія. Простымъ примѣромъ является переносъ энергіи, происходящій при перемѣщеніи вагона лошадыю или моторомъ. Энергія переносится лишь при томъ условіи, если канатъ, прикрѣпленный къ вагону, испытываетъ опредѣленное натяженіе въ P кгр. и если его тянуть съ опредѣленной скоростью v $\frac{\text{метр}}{\text{сек.}}$. Въ такомъ случаѣ

лошадь или моторъ отдають и вагонъ поглощаетъ мощность, равную $P \cdot v \frac{\text{кгр.-м.}}{\text{сек.}}$. То же самое происходитъ и въ томъ случаѣ, если вагонъ скрѣпленъ съ локомотивомъ и мощность передаетъ поршневая штанга паровой машины локомотива, попеременно двигаясь взадъ и впередъ.

Другимъ примѣромъ можетъ служить переносъ мощности при помощи трансмиссионнаго вала. Мощность можетъ быть имъ передана лишь при томъ условіи, чтобы, во-первыхъ, къ его шкиву были приложены силы, вызывающія въ валѣ напряженіе крученія, и, во-вторыхъ, чтобы онъ находился во вращательномъ движеніи. Полная величина напряженія крученія выражается приложеннымъ къ шкиву вращающимъ моментомъ Q , который мы можемъ выразить въ килограммъ-метрахъ; мѣрою движенія служитъ угловая скорость $\omega = 2\pi N$, гдѣ N — число полныхъ оборотовъ въ секунду. Въ такомъ случаѣ передаваемая валомъ мощность равняется $Q \cdot \omega \frac{\text{кгр.-м.}}{\text{сек.}}$. Связанный съ напряженіями процессъ движенія, переносящій энергію, ограничивается поверхностью вала, гдѣ постоянно происходитъ скольженіе по окружающей средѣ — воздуху или подшипнику. Слой, въ которомъ происходитъ это скольженіе, мы можемъ считать проводникомъ потока энергіи, такъ какъ направленіе послѣдняго зависитъ отъ ориентировки этого слоя. Напримѣръ, потокъ энергіи при гибкомъ валѣ можно направлять по произволу; онъ всегда идетъ параллельно поверхности вала, т.-е. слою скольженія. Такъ какъ скольженіе всегда соединено съ треніемъ, то напряженіе вала отъ шкива, соединеннаго съ моторомъ, до шкива, на который накидывается ремень потребляющей мощности машины, испытываетъ небольшія потери, особенно въ твердыхъ подшипникахъ, и вращающій моментъ второго шкива нѣсколько меньше момента, съ которымъ моторъ вращаетъ свой ременный шкивъ. Параллельно съ потерей напряженія происходитъ и небольшая потеря мощности: небольшая часть передаваемой валомъ энергіи превращается въ теплоту тренія.

Также и въ модели эфира, описанной въ § 252, энергія переносится только въ томъ случаѣ, если, во-первыхъ, происходятъ вращательныя движенія шариковъ, представляющія магнитное поле, и если, во-вторыхъ, вмѣстѣ съ тѣмъ въ упругихъ клѣткахъ, которыя соединяются между собою шариками, дѣйствуютъ напряженія, представляющія электрическое поле. Переносимая мощность пропорціо-

нальна произведенію изъ силы напряженія и скорости вращательнаго движенія, т.-е. и эта модель подчиняется теоремѣ Пойнтинга. Направленіе, въ которомъ переносится энергія, въ этой модели перпендикулярно какъ къ направленію напряженія (электрическихъ силовыхъ линій), такъ и къ направленію осей вращенія (магнитныхъ силовыхъ линій). Если, на примѣръ, напряженіе распространяется параллельно поверхности „проводника“, какъ на рис. 172, то мощность со всѣхъ сторонъ вносится въ „проводникъ“ совершенно такъ же, какъ и у настоящихъ проводниковъ большого сопротивленія (на примѣръ, у лампъ накаливанія). Но если бы направленіе напряженія было приблизительно перпендикулярно къ поверхности проводника, какъ въ случаѣ кабеля малаго сопротивленія, то и на модели энергія распространялась бы вдоль проводника, и лишь малая ея часть терялась бы въ проводникѣ, который является передатчикомъ потока энергіи и въ которомъ должны происходить скольженія упругихъ клѣтокъ о шарики.

Такимъ образомъ, существуетъ полная аналогія между механическими процессами въ передающемъ энергію трансмиссіонномъ валѣ, съ одной стороны, и электромагнитными процессами въ кабелѣ, съ другой. Поэтому въ послѣдующемъ, когда намъ желательно будетъ прибѣгать къ сравненію съ механическими процессами, мы чаще всего будемъ пользоваться не сложной моделью эфиря, описанной въ § 252, но трансмиссіоннымъ валомъ.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ
СИЛОВЫЯ (ПОНДЕРОМОТОРНЫЯ) ДѢЙСТВІЯ
МАГНИТНАГО ПОЛЯ.

СИЛОВОЕ ДѢЙСТВІЕ МАГНИТНАГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИКЪ
СЪ ТОКОМЪ.

283. Формулированный въ электростатикѣ (§ 63) принципъ противодѣйствія примѣнимъ также и къ стационарнымъ магнитнымъ

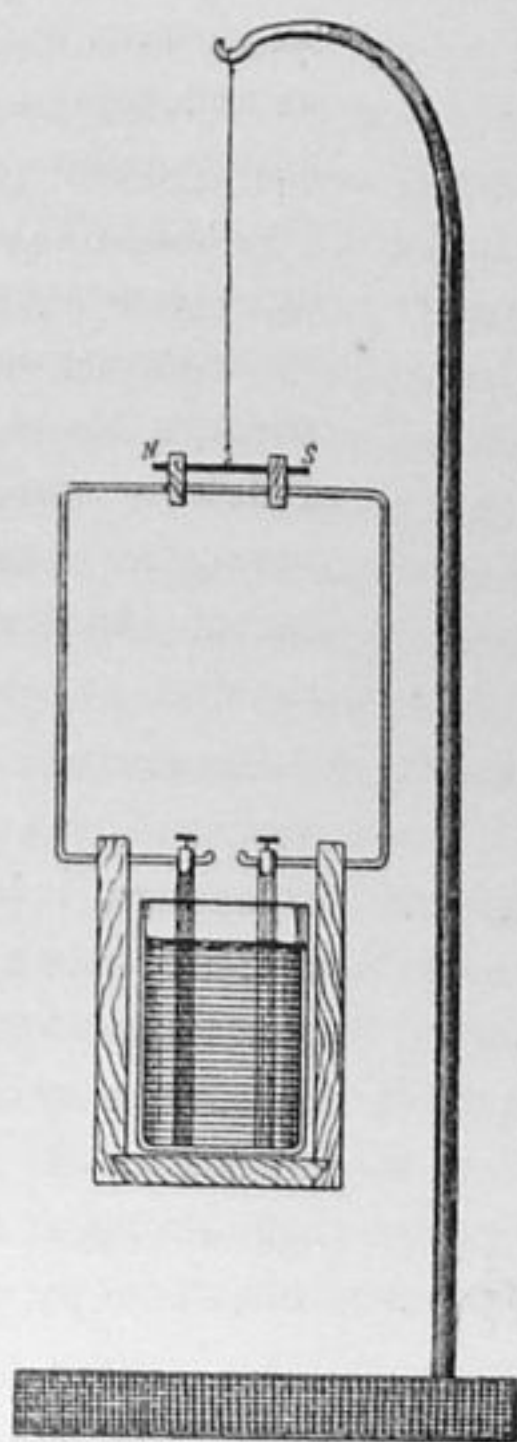


Рис. 192. Принципъ противодѣйствія.

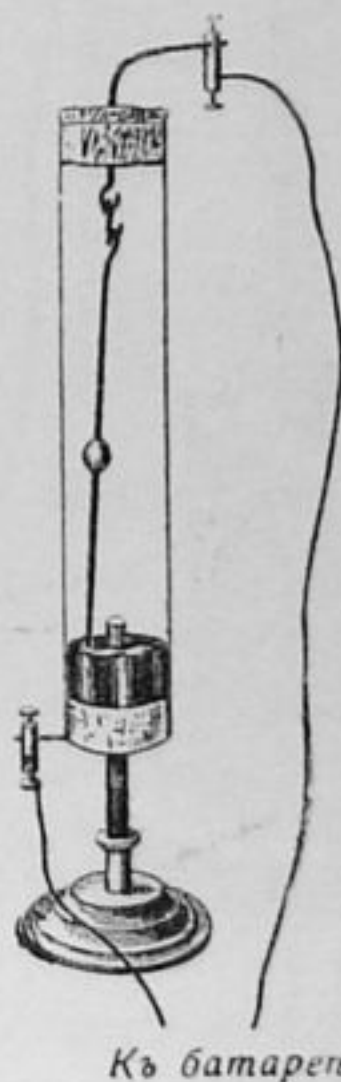


Рис. 193. Вращеніе проводника съ токомъ вокругъ магнитнаго полюса.

полямъ. Если мы соединимъ нѣсколько постоянныхъ магнитовъ неподвижнымъ образомъ другъ съ другомъ или же неподвижный провод-

никъ съ токомъ соединимъ неподвижно съ постояннымъ магнитомъ, то внутреннія силовыя дѣйствія не смогутъ вызвать никакого движенія, ни поступательнаго, ни вращательнаго. Если, на примѣръ, подвѣсить на тонкой легко вращающейся нити (рис. 192) магнитъ, неподвижно соединенный съ проводникомъ съ токомъ, то не произойдетъ никакого вращенія, хотя на магнитъ въ полѣ тока дѣйствуетъ большой вращающій моментъ. Отсюда слѣдуетъ, что проводникъ съ токомъ въ полѣ магнита испытываетъ такое силовое дѣйствіе, которое въ точности уравновѣшивается дѣйствіемъ проводника на магнитъ.

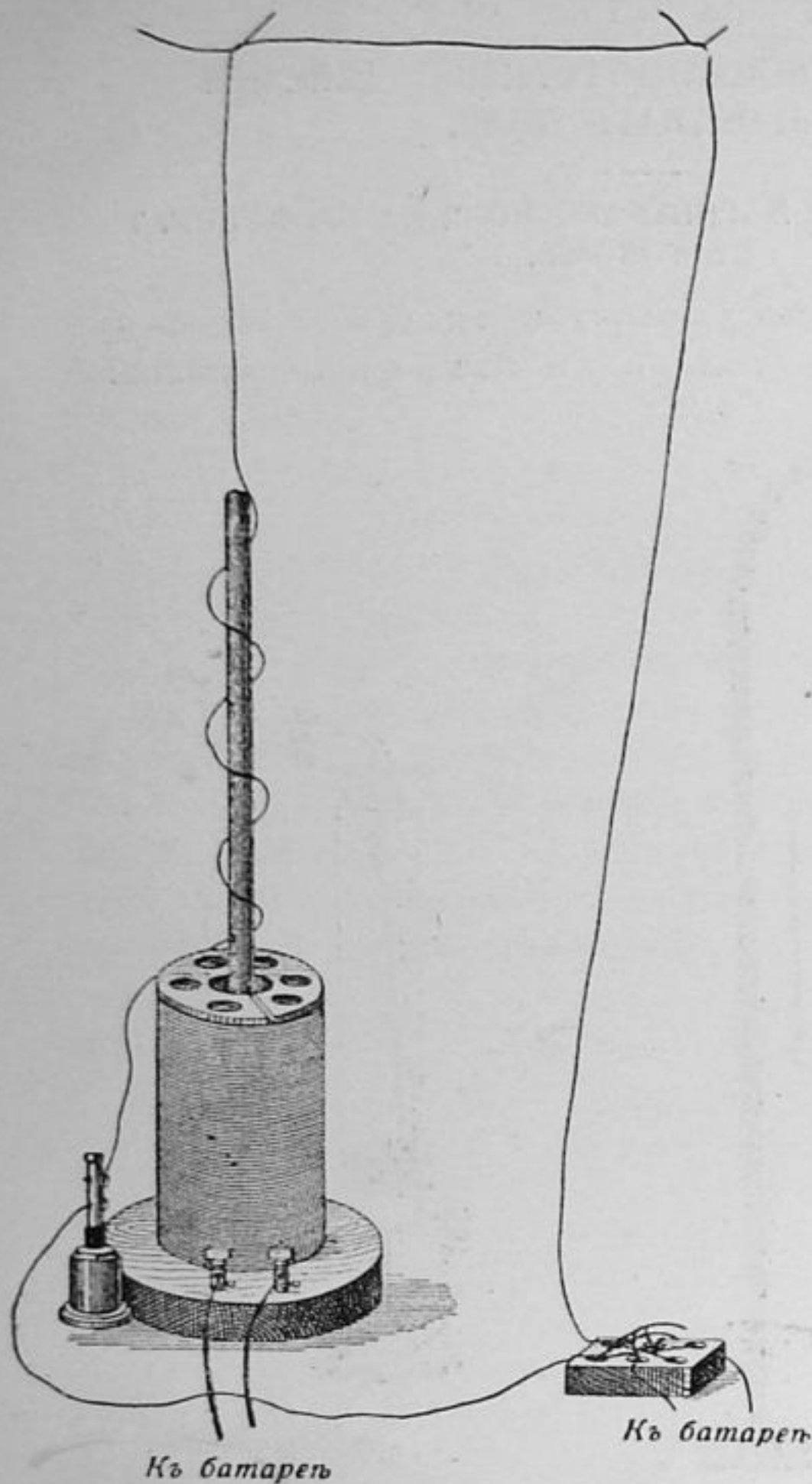


Рис. 194. Проволока, по которой идетъ токъ, обвивается вокругъ магнитнаго стержня.

проволоку, погруженную въ ртуть, окружающую одинъ изъ полюсовъ

Это силовое дѣйствіе можно легко продемонстрировать непосредственно, если въ опытѣ, описанномъ въ § 236, магнитъ закрѣпить неподвижно, а прямолинейный проводникъ съ токомъ расположить такъ, чтобы онъ могъ вращаться вокругъ одного изъ полюсовъ магнита. Если черезъ короткую мѣдную проволоку, погруженную въ ртуть, окружающую одинъ изъ полюсовъ

магнита, пропустить токъ, то проводникъ начнетъ вращаться вокругъ магнита. Это вращеніе происходитъ изъ-за того, что на проводникъ дѣйствуетъ силовое дѣйствіе магнитнаго поля, которое не уравновѣшивается дѣйствіемъ магнита на проводникъ.

магнита (рис. 193), пустить токъ, то она начинаетъ тотчасъ вращаться въ направленіи, которое указывается принципомъ противодѣйствія.

То же самое можно показать на весьма интересномъ опытѣ, если воспользоваться болѣе интенсивнымъ силовымъ дѣйствіемъ электромагнита. На рис. 194 представлена намагничивающая катушка, изъ которой выдается вверхъ на большое разстояніе ея желѣзный сердечникъ. Рядомъ съ этимъ послѣднимъ подвѣшена мягкая проволока, нижній конецъ которой укрѣпленъ въ зажимѣ; вначалѣ проволока свободно спускается внизъ. Отъ зажима идетъ проводъ къ одному полюсу батареи; другой ея полюсъ соединенъ съ верхнимъ концомъ подвѣшенной проволоки. Какъ только мы замкнемъ токъ батареи, проволока начинаетъ вращаться вокругъ электромагнита; такъ какъ она снизу закрѣплена, то она наматывается на выступающій изъ катушки сердечникъ. Если измѣнить направленіе тока, то проволока сначала разматывается, а затѣмъ наматывается на сердечникъ въ обратномъ направленіи. Замѣтивъ, въ какомъ направленіи наматывается проволока, мы убѣдимся, что ея витки съ токомъ усиливаютъ магнитное поле, намагничивающее сердечникъ. Отсюда мы должны заключить, что энергія магнитнаго поля увеличивается при этомъ движеніи проволоки съ токомъ. Слѣдовательно, батарея должна давать

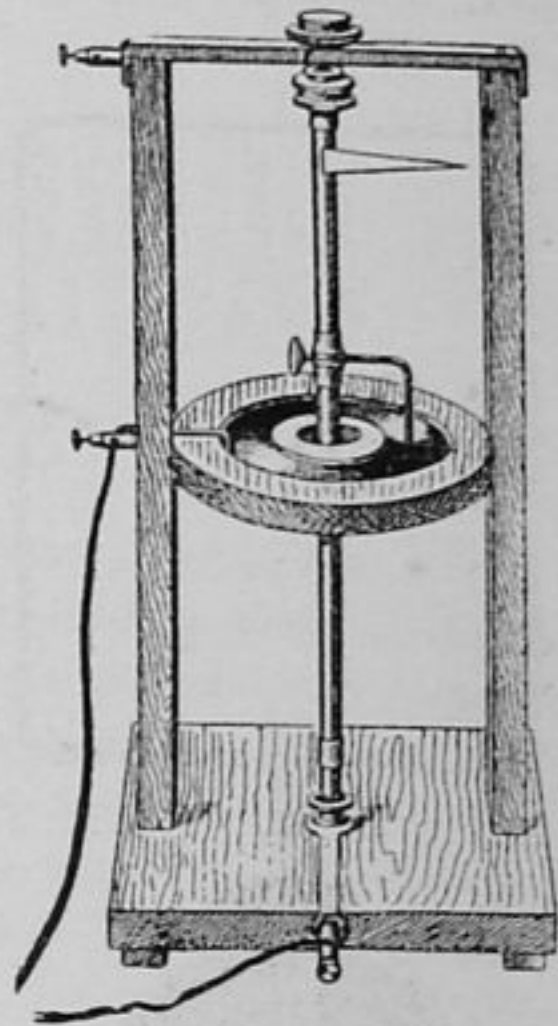


Рис. 195. Магнитный стержень въ качествѣ мотора.

энергію не только для движенія проволоки, но и для усиленія магнитнаго поля. То же самое можно замѣтить и во всѣхъ нижеописанныхъ опытахъ, въ которыхъ проводникъ съ токомъ движется въ магнитномъ полѣ къ положенію равновѣсія.

Изъ одного магнитнаго стержня можно, какъ замѣтилъ впервые Фарадэй, сдѣлать моторъ, если черезъ одну его половину пропускать электрической токъ вдоль его длины. Для этого нужно приблизительно посрединѣ магнита помѣстить скользящій контактъ, соединенный съ однимъ полюсомъ источника электричества. Другой полюсъ соединяется съ концомъ магнита. Если послѣдній можетъ вра-

щаться вокругъ своей длинной оси (рис. 195), то при замыканіи тока онъ начинаетъ вращаться. Исходящее изнутри магнитное поле, пересѣкая наружныя части магнита, дѣйствуетъ на нихъ, когда онѣ проводятъ токъ, совершенно такъ же, какъ въ опытѣ съ вращеніемъ мѣдной проволоки (рис. 193).

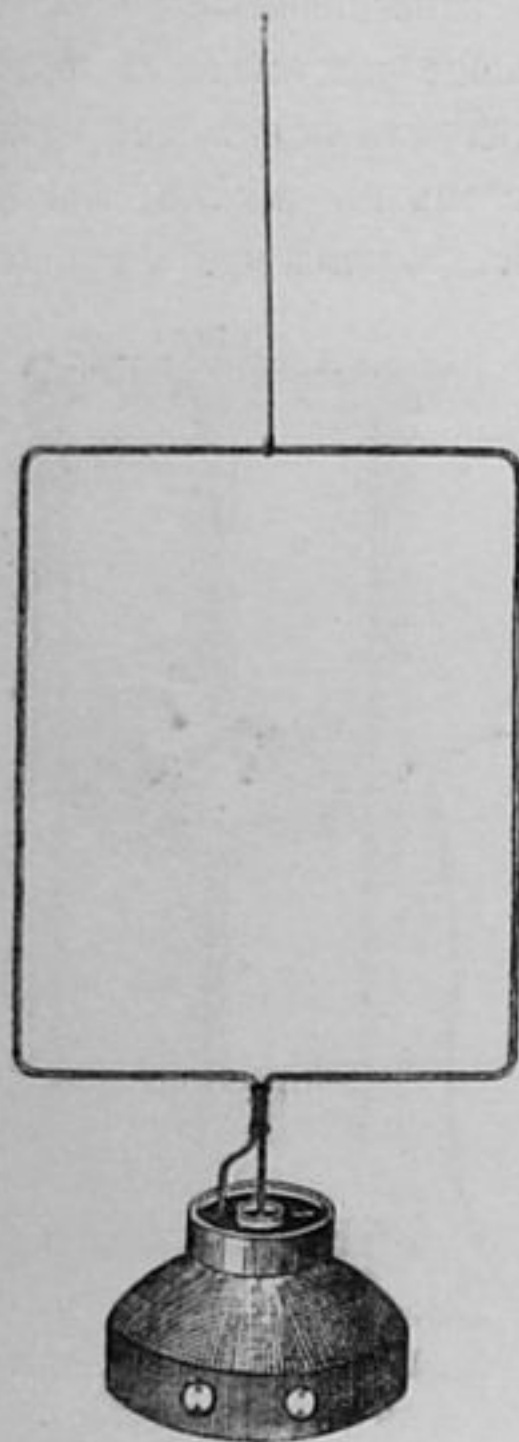


Рис. 196. Станокъ Ампера.

284. Чтобы точнѣе изучить сило-
вое дѣйствіе, испытываемое проводни-
комъ съ токомъ въ магнитномъ полѣ,
подвѣсимъ проволочный прямоугольникъ
на нити, прикрѣпленной посрединѣ верх-
ней горизонтальной стороны. Нижняя
сторона посрединѣ имѣетъ разрывъ, и
оба конца проволоки погружены въ
чашки со ртутью, изъ которыхъ одна
окружаетъ кольцеобразно другую. Эти
двѣ чашки соединяются съ полюсами ба-
тарей, такъ что прямоугольникъ можетъ
вращаться вокругъ своей вертикальной
средней линіи безъ перерыва тока. Та-
кой приборъ былъ построенъ впервые
Амперомъ (Ampère) и называется стан-
комъ Ампера (рис. 196). Если прибли-
зить къ одной изъ вертикальныхъ сто-
ронъ прямоугольника магнитный полюсъ,
то оказывается слѣдующее:

Проволока, несущая токъ, ис-
пытываетъ въ магнитномъ полѣ
дѣйствіе силы, направленіе кото-
рой перпендикулярно къ силовымъ
линіямъ и къ направленію тока;

эта сила тѣмъ больше, чѣмъ сильнѣе, во-первыхъ, магнит-
ное поле и, во-вторыхъ, токъ.

Направленіе дѣйствія силы можно опредѣлить и помимо опыта
на основаніи принципа противодѣйствія. Она дѣйствуетъ въ такомъ на-
правленіи, въ которомъ слѣдуетъ смотрѣть, чтобы уголъ отъ направле-
нія тока къ направленію магнитнаго поля, описываемый слѣва направо,
былъ меньше двухъ прямыхъ. (Ср. рис. 191, гдѣ слѣдуетъ замѣнить E
„электрическимъ токомъ“ и потокъ энергіи — „силовымъ дѣйствіемъ“).

Если прямоугольникъ съ токомъ малъ по сравненію съ размѣрами поля, то онъ стремится установиться такимъ образомъ, чтобы его поверхность была перпендикулярна къ направленію поля и чтобы собственное магнитное поле внутри его имѣло одинаковое направленіе съ большимъ магнитнымъ полемъ. То же правило справедливо и для небольшого плоскаго замкнутаго тока любой формы. Если цѣлый рядъ одинаковыхъ круговыхъ токовъ соединенъ въ видѣ соленоида, то длинная ось соленоида стремится установиться въ направленіи силовыхъ линий. Мы видѣли въ § 237, что собственное магнитное поле соленоида съ токомъ вполнѣ аналогич-

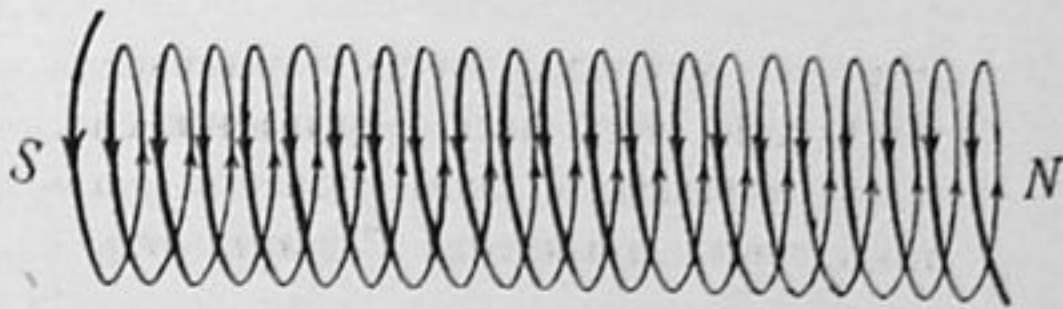


Рис. 197. Соленоидъ въ качествѣ магнитнаго стержня.

но полюю прямого магнита. Соленоидъ имѣетъ „сѣверный полюсъ“, изъ котораго выходятъ силовыя линіи его поля, и „южный полюсъ“, въ который онъ входятъ. Въ большомъ магнитномъ полѣ соленоидъ устанавливается такъ, что его сѣверный полюсъ обращенъ въ положительную сторону силовыхъ линий, такъ какъ поле тока внутри соленоида имѣетъ тогда такое же направленіе, какъ и дѣйствующее поле.

Такимъ образомъ соленоидъ во всѣхъ отношеніяхъ подобенъ прямому магниту (рис. 197). Если взять два соленоида съ токами, то съ ними возможно производить совершенно такіе же опыты, какъ съ двумя прямыми магнитами. Одноименные полюса соленоидовъ взаимно отталкиваются, разноименные — притягиваются.

285. Если два соленоида обращены другъ къ другу разноименными полюсами, то въ обоихъ виткахъ соленоидовъ, расположенныхъ непосредственно другъ противъ друга, токъ идетъ въ одномъ и томъ же направленіи. Такъ какъ эти полюса взаимно притягиваются, то, слѣдовательно, два проводника, въ которыхъ токъ имѣетъ одинаковое направленіе, стремятся приблизиться другъ къ другу. Обратное, разноименные полюса двухъ соленоидовъ отталкиваются, изъ чего мы заключаемъ, что проводники съ токами противоположныхъ направленій стремятся удалиться другъ отъ друга.

Параллельные проводники взаимно притягиваются, если токи въ нихъ имѣютъ одинаковыя направленія, и взаимно отталкиваются, если токи въ нихъ имѣютъ противоположныя направленія.

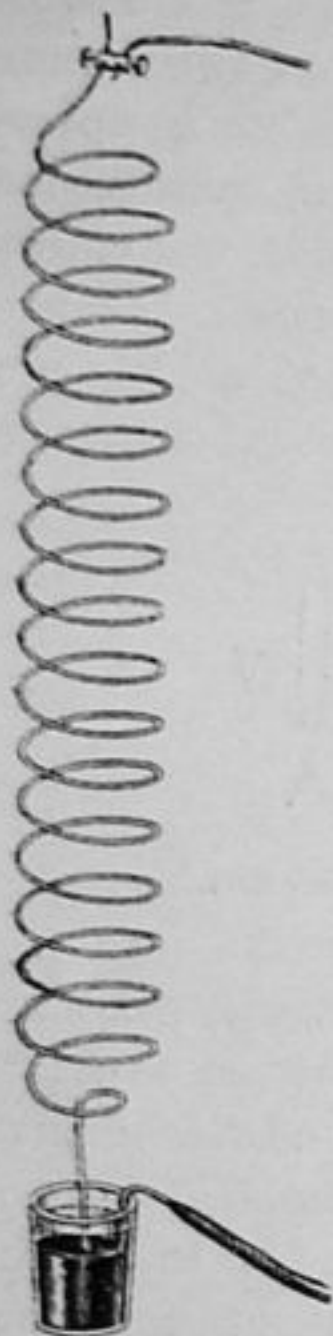


Рис. 198. Танцующая спираль.

Если свободно подвѣсить соленоидъ изъ упругой проволоки, то, при прохожденіи черезъ него тока, онъ стягивается, такъ какъ всѣ его витки взаимно притягиваются. Это легко показать, подводя токъ къ нижнему концу соленоида черезъ стаканчикъ со ртутью (рис. 198). Если токъ достаточно силенъ, то соленоидъ стягивается настолько, что его нижній конецъ выскакиваетъ изъ ртути. Вслѣдствіе этого токъ прерывается, соленоидъ вновь подъ дѣйствіемъ силы тяжести растягивается, и токъ опять замыкается. Такимъ образомъ нижній конецъ соленоида непрерывно движется вверхъ и внизъ („танцующая спираль“).

Взаимное отталкиваніе проводниковъ съ противоположно направленными токами приводитъ къ интересному слѣдствію: замкнутый плоскій токъ стремится расширяться такъ, чтобы ограничиваемая проводникомъ площадь была возможно большею. Это явленіе можно демонстрировать при помощи горизонтальнаго прямоугольника съ токомъ, имѣющаго три неподвижныя стороны изъ толстой проволоки; четвертая его сторона представляетъ собой цилиндрической стержень, который можетъ катиться по двумъ пересѣкаемымъ имъ сторонамъ, какъ по рельсамъ. Если эту подвижную сторону мы помѣстимъ вблизи противоположной неподвижной стороны прямоугольника такъ, чтобы остальные двѣ стороны были весьма короткими, и замкнемъ токъ, то подвижная сторона откатится отъ неподвижной.

ИЗМѢРИТЕЛИ ТОКА СЪ ПОДВИЖНЫМЪ ПРОВОДНИКОМЪ.

286. Если между полюсами сильнаго электромагнита пропустить длинную гибкую проволоку (рис. 199) и концы ея при помощи коммутатора соединить съ батареей, то въ моментъ замыканія тока проволока изогнется въ направленіи, перпендикулярномъ къ магнитнымъ

силовымъ линиямъ. Если измѣнить направленіе тока, то проволока выгибается въ противоположную сторону.

Это явленіе, согласующееся съ изложенными въ § 284 законами, было использовано физиологомъ Эйнтховеномъ (Einthoven) для построения весьма важнаго измѣрителя тока — струннаго галь-

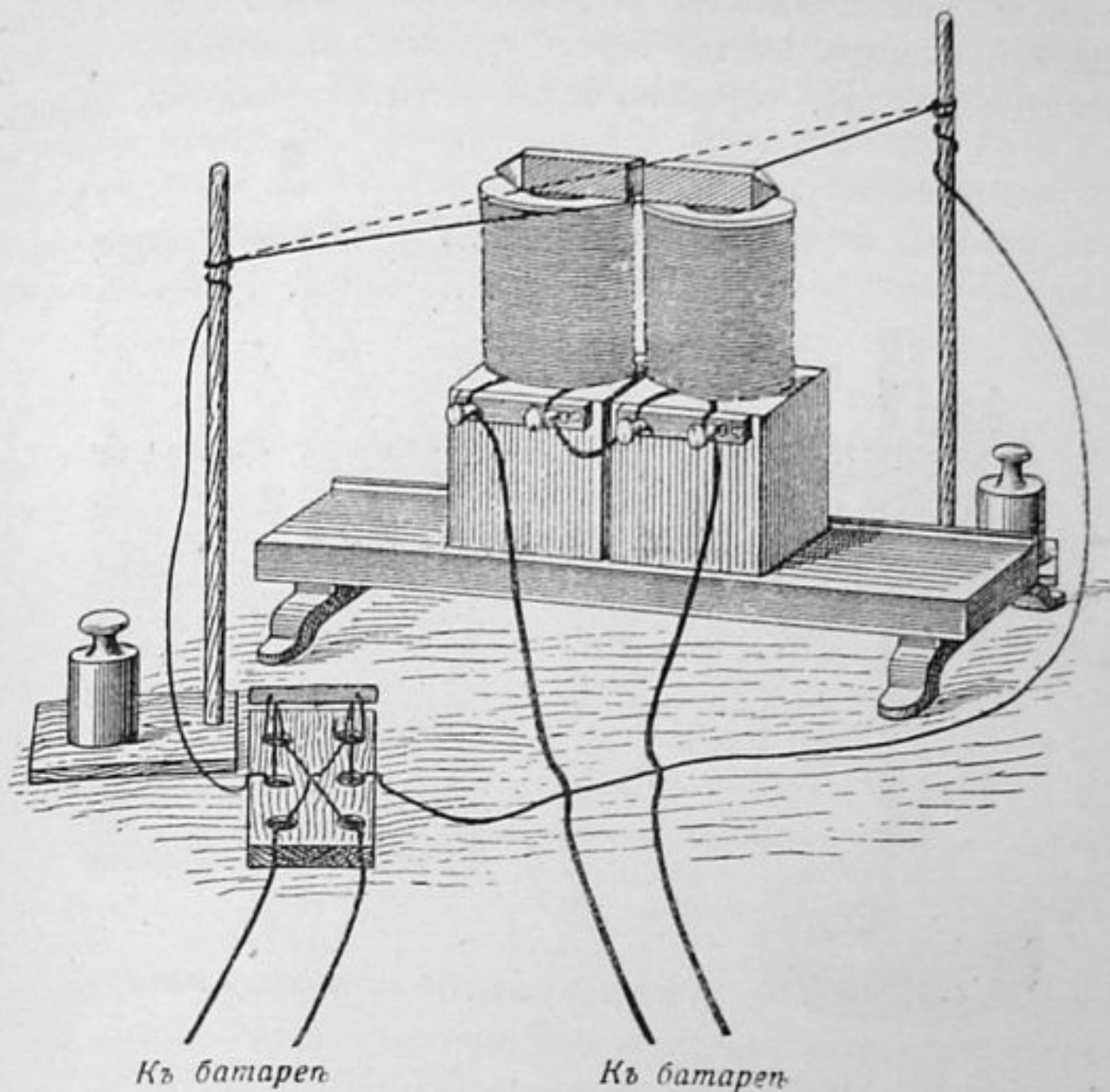


Рис. 199. Прямой гибкій проводникъ съ токомъ между двумя магнитными полюсами.

ванометра. Въ полѣ сильнаго подковообразнаго магнита (рис. 200), башмаки котораго отдѣлены одинъ отъ другого лишь узкой щелью, натянута „струна“ — чрезвычайно тонкая платиновая нить (проволока Вульстена) или же кварцевая нить, покрытая слоемъ распыленной (ср. § 175) платины и потому обладающая проводимостью. Нить наблюдается при помощи микроскопа, который установленъ передъ отверстіемъ, проходящимъ черезъ оба полюсные башмака. Если по нити проходитъ токъ, то она отклоняется въ сторону и

тѣмъ больше, чѣмъ сильнѣе токъ. Отклоненіе измѣряется при помощи окулярнаго микрометра микроскопа. Такъ какъ нить отклоняется тѣмъ сильнѣе, чѣмъ свободнѣе она виситъ, то инструментъ можно употреблять для различныхъ областей измѣреній, измѣняя лишь натяженіе нити. На рис. 200 виденъ сверху микрометрической винтъ, который служитъ для регулировки напряженія нити. Струнный гальванометръ имѣетъ передъ прочими измѣрителями тока то преимущество, что, вслѣдствіе малой инерціи струны, онъ чрезвы-

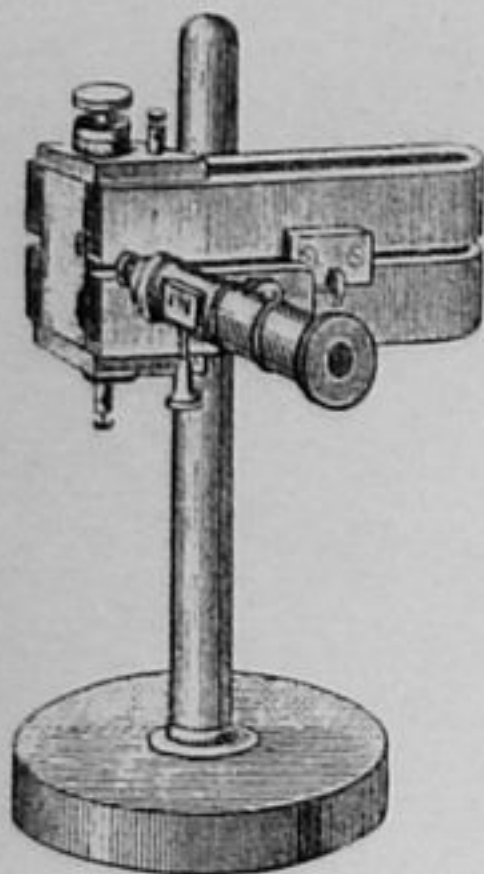


Рис. 200. Струнный гальванометръ.



Рис. 201. Осциллографъ (схематически).

чайно быстро реагируетъ на всякое колебаніе тока. Поэтому струнный гальванометръ часто употребляется въ соединеніи съ фотографическимъ регистрирующимъ аппаратомъ, воспринимающимъ на быстро движущейся полосѣ фотографической бумаги изображеніе малой части струны. Если полоса движется перпендикулярно къ направлению перемѣщеній струны, то получается кривая, изображающая измѣненіе силы тока съ теченіемъ времени.

Струнный гальванометръ съ двумя струнами, изъ которыхъ одна подводитъ токъ, а другая отводитъ его, называется осцил-

логграфомъ. Отклоненіе струнъ, движущихся въ прямо противоположныхъ направленіяхъ, дѣлаютъ видимымъ при помощи легкаго зеркальца, прикрѣпленнаго посрединѣ струнъ (рис. 201). Если по струнамъ течетъ токъ, то зеркальце слегка отклоняется, что наблюдается на отражаемомъ имъ свѣтовомъ лучѣ. Если этотъ свѣтовой лучъ послѣ отраженія падаетъ на бумагу фотографическаго регистрирующаго аппарата, то получаютъ кривыя, изображающія измѣненія тока съ теченіемъ времени. Упомянутыя въ § 193 измѣренія переменныхъ токовъ въ угольной свѣтовой дугѣ, сдѣланныя Г. Т. Симономъ, были произведены главнымъ образомъ такимъ путемъ при помощи осциллографа и регистрирующаго аппарата. Симонъ пользовался одновременно двумя инструментами, изъ которыхъ одинъ

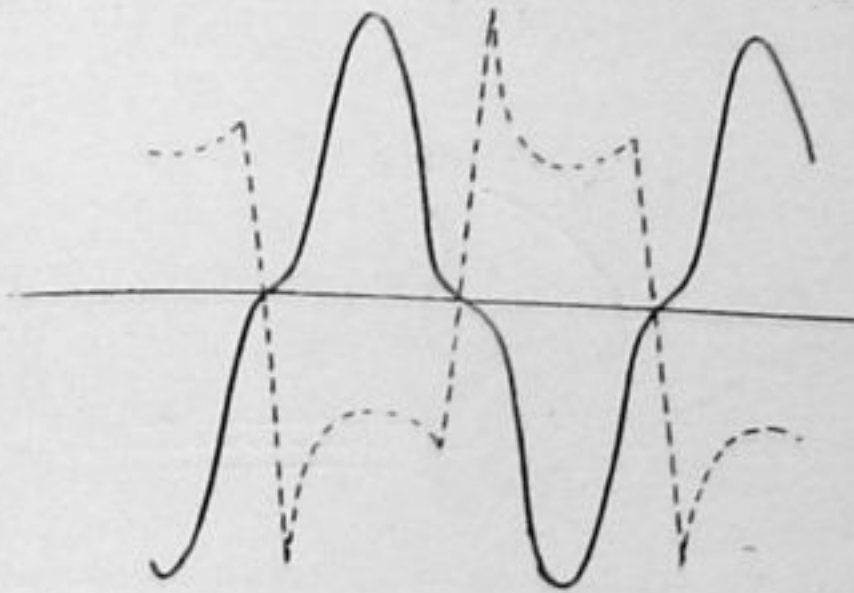


Рис. 202. Кривая силы тока и кривая напряженія свѣтовой дуги переменнаго тока, снятая посредствомъ осциллографа.
 — сила тока, ---- напряженіе.

служилъ въ качествѣ амперметра, а другой — въ качествѣ вольтметра, и проектировалъ кривую силы тока и кривую напряженія на одно и то же мѣсто бумаги регистрирующаго прибора. На рис. 202 представлена одна изъ снятыхъ имъ паръ кривыхъ. Чтобы получить по нимъ кривую силы тока и напряженія, отсчитываютъ по налагающимся кривымъ, какое напряженіе соотвѣтствуетъ каждому значенію силы тока, и обычнымъ путемъ наносятъ на координатной сѣти напряженіе, какъ функцію силы тока. Такимъ способомъ получаютъ кривыя, подобныя изображенной на рис. 127. Если заставить свѣтовой лучъ, отраженный отъ зеркальца осциллографа, падать не на фотографическую бумагу регистрирующаго аппарата, а на вращающееся зеркало и отсюда на экранъ, то можно эти кривыя весьма эффектно демонстрировать объективно.

Въ качествѣ какъ бы струннаго гальванометра можетъ служить также трубка Брауна. Роль „струны“ въ этомъ случаѣ исполняетъ пучекъ катодныхъ лучей, выходящій изъ діафрагмы. Но, въ отличіе отъ настоящаго струннаго гальванометра, токъ катоднаго луча поддерживается постояннымъ, а измѣряемый токъ пропускается, какъ въ обыкновенномъ гальванометрѣ, черезъ двѣ катушки, между которыми проходитъ пучекъ катодныхъ лучей (рис. 203). Поле тока отклоняетъ его тѣмъ сильнѣе, чѣмъ больше сила тока; это отклоненіе наблюдается при помощи свѣтового пятна на флуоресцирующемъ экранѣ трубки. Въ этомъ инструментѣ отклоненіе происходитъ почти моментально, и его можно примѣнять также къ изслѣдованію переменныхъ токовъ весьма высокой частоты, съ числомъ перемѣнъ, достигающимъ многихъ милліоновъ въ секунду. Если требуется

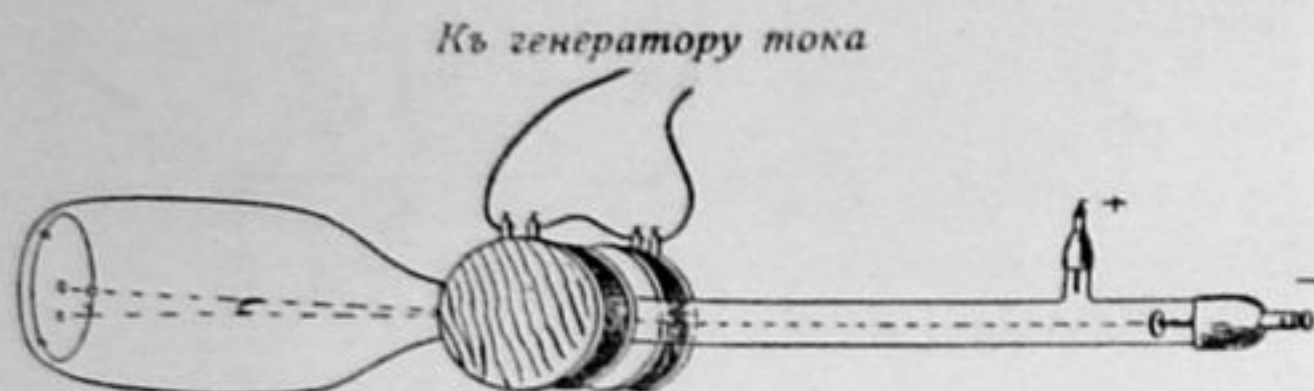


Рис. 203. Трубка Брауна въ качествѣ гальванометра.

большая чувствительность, то пользуются трубкой Венельта съ ея совершенно мягкими катодными лучами. Если трубку Брауна, установленную въ качествѣ электрометра (см. рис. 99), снабдить еще гальванометрическими катушками, магнитное поле которыхъ параллельно электрическому полю между пластинами электрометра, то пятно подъ вліяніемъ обоихъ полей будетъ испытывать отклоненія въ двухъ взаимно перпендикулярныхъ направленіяхъ и будетъ показывать одновременно напряженіе и силу тока. Такимъ образомъ, при помощи этой трубки можно, напримѣръ, прямо снять кривую напряженія и силы тока свѣтовой дуги переменнаго тока. Этотъ методъ тоже былъ примѣненъ Г. Т. Симономъ. Онъ пригоденъ даже для такихъ чрезвычайно быстрыхъ электрическихъ колебаній, къ которымъ осциллографъ уже непримѣнимъ.

287. Важнѣйшій инструментъ, основанный на дѣйствіи сильнаго магнитнаго поля на проводникъ съ токомъ, это — гальванометръ

д' Арсонваля (D' Arsonval). Въ этомъ инструментѣ (рис. 204) проводникъ, по которому проходитъ токъ, представляетъ собою тонкую проволоку, намотанную на весьма легкую прямоугольную рамку, подвѣшенную на тонкой нити между полюсами сильнаго стального магнита. Чтобы возможно лучше сконцентрировать поле магнита, внутри прямоугольной катушки помѣщается еще цилиндрической желѣзный сердечникъ, прикрѣпленный къ штативу гальванометра. Въ инструментѣ, изображенномъ на рис. 204, токъ подводится при посредствѣ металлической нити подвѣса и другой тонкой нити, спускающейся внизъ совершенно свободно и при вращеніи катушки не получающей никакихъ замѣтныхъ напряженій. Въ последнее время весьма часто строятся также и градуированные амперметры со вращающимися катушками (рис. 205). Въ этихъ инструментахъ катушка вращается на оси, снабженной двумя заостренными подшипниками, а направляющую силу ей сообщаютъ двѣ тонкія часовыя пружины, изъ которыхъ на рис. 205 изображена лишь одна. Эти часовыя пружины служатъ также для того, чтобы подводить токъ. Конечно, такіе инструменты можно строить лишь для слабыхъ токовъ, но, пользуясь надлежащими параллельными отвлѣченіями (§ 260), ихъ можно употреблять для любой области измѣреній.

Инструменты съ вращающейся катушкой имѣютъ, по сравненію съ инструментами съ подвижнымъ магнитомъ, то важное преимущество, что ихъ показанія независимы отъ внѣшнихъ магнитныхъ полей. Въ этомъ отношеніи они превосходятъ даже панцирные гальванометры. Въ тѣхъ мѣстахъ, гдѣ происходятъ сильныя магнитныя возмущенія отъ электрическихъ дорогъ и т. п., работать возможно почти исключительно съ инструментами съ подвижными катушками. Особенностью инструментовъ съ вращающейся катушкой является то ихъ свойство, что ихъ затуханіе существенно зависитъ

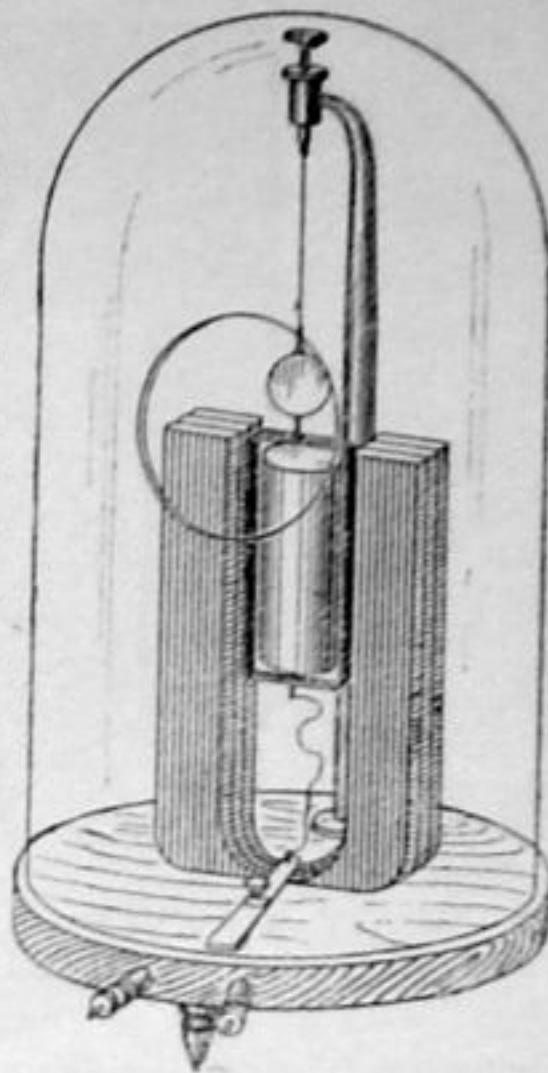


Рис. 204. Старая форма гальванометра д' Арсонваля.

отъ ихъ сопротивленія. Существуетъ опредѣленная наиболѣе благоприятная величина сопротивленія, при которой инструментъ является „аперіодическимъ“, т.-е. указатель устанавливается быстро и безъ колебаній въ обѣ стороны. Къ этому обстоятельству мы еще возвратимся ниже (§ 302).

288. Кромѣ гальванометра д' Арсонваля существуетъ еще иной типъ гальванометра съ вращающейся катушкой, отличающийся тѣмъ, что въ немъ отклоняющимъ магнитнымъ полемъ слу-

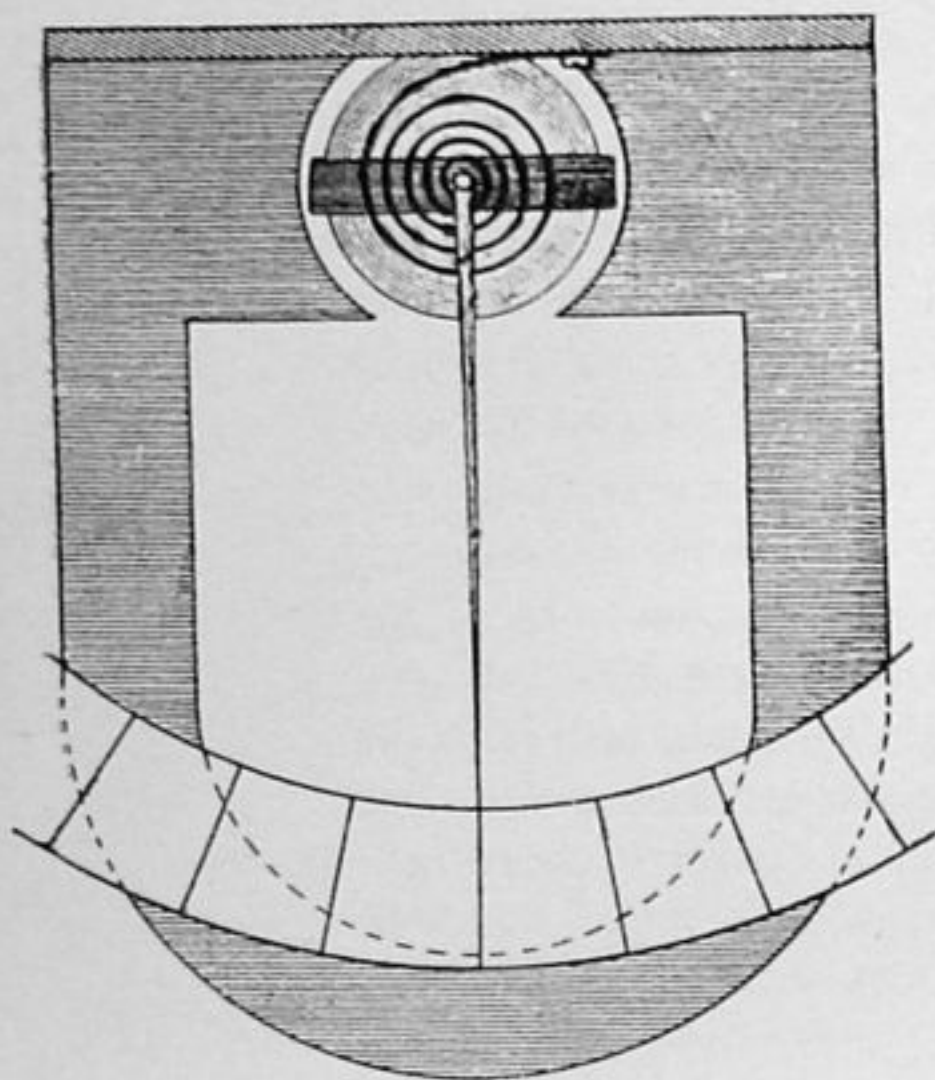


Рис. 205. Амперметръ съ вращающейся катушкой (схематически).

жить поле катушки съ токомъ. Такой инструментъ, совершенно лишенный желѣза, былъ примѣненъ впервые В. Веберомъ (Weber) въ 1846 году; его обычно называютъ электродинамометромъ. Электродинамометръ съ зеркальнымъ отсчетомъ отличается отъ изображеннаго на рис. 204 гальванометра главнымъ образомъ только тѣмъ, что вмѣсто подковообразнаго магнита въ немъ помѣщены двѣ катушки, плоскость витковъ которыхъ перпендикулярна къ плоскости витковъ вращающейся катушки. Кромѣ того въ электродинамометрѣ отсутствуетъ желѣзный цилиндръ внутри подвижной ка-

тушки. Въ инструментѣ, изображенномъ на рис. 206, неподвижная катушка находится цѣликомъ внутри подвижной. Отсчетъ на такомъ инструментѣ дѣлается по особому методу, изобрѣтенному Сименсомъ (Siemens). Подвижная катушка виситъ на нити и кромѣ того соединена со спиральной пружиной, которую можно натянуть до желаемой степени при помощи крутильной головки. Эту головку закручиваютъ настолько, чтобы подвижная катушка находилась во вполне определенномъ положеніи, при которомъ соединенный съ нею стерженекъ устанавливается на определенной мѣткѣ. Если въ катушкахъ тока нѣтъ, то пружина не натянута, и указатель, соединенный съ крутильной головкой, показываетъ нуль. Когда же черезъ катушки проходитъ токъ, то пружину нужно закрутить настолько, чтобы ея упругая сила въ точности уравновѣшивала силовое дѣйствіе, испытываемое подвижной катушкой въ полѣ неподвижной.

Уголь закручиванія отсчитывается на раздѣленномъ кругѣ, по которому движется указатель вращающейся головки; этотъ уголь и является мѣрою силового дѣйствія магнитнаго поля.

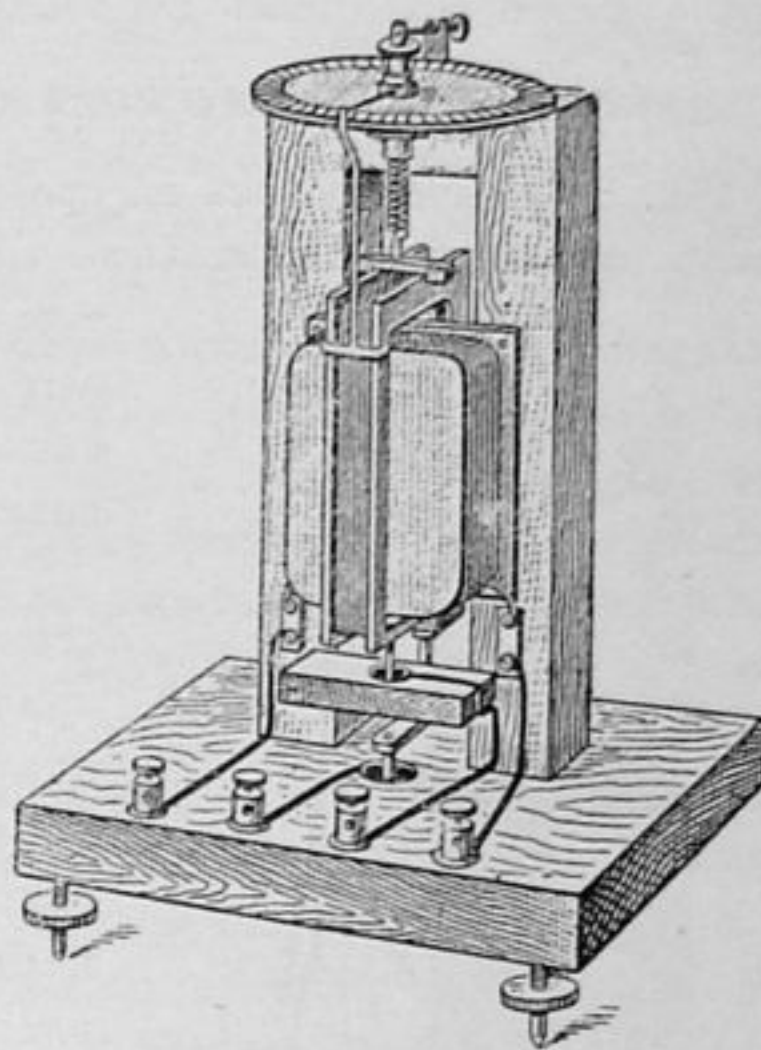


Рис. 206. Крутильный электродинамометръ.

Если обѣ катушки электродинамометра включить въ цѣпь послѣдовательно, то имъ, какъ и всякимъ гальванометромъ, можно пользоваться и въ качествѣ амперметра и въ качествѣ вольтметра. Съ инструментами, содержащими мягкое желѣзо, и съ тепловыми инструментами электродинамометръ имѣетъ то сходство, что его отклоненіе не измѣняется при измѣненіи направленія тока, и его чувствительность при большихъ силахъ тока выше, чѣмъ при малыхъ. Это обстоятельство зависитъ отъ того, что какъ отклоняющее поле, такъ и токъ въ подвижномъ проводникѣ всегда измѣняются въ одномъ и томъ же смыслѣ.

Весьма часто электродинамометромъ пользуются, какъ измѣрителемъ мощности, т.-е. въ качествѣ ваттметра. Въ этомъ случаѣ неподвижная катушка включается въ цѣпь, какъ катушка амперметра, а подвижная катушка черезъ достаточное предварительное сопротивление соединяется, подобно катушкѣ вольтметра, съ зажимами, между которыми переносится энергія. По отклоненію мы находимъ произведеніе изъ силы тока и напряженія, т.-е. измѣряемую мощность.

Полное отсутствіе желѣзныхъ частей дѣлаетъ электродинамометръ особенно пригоднымъ для измѣреній переменныхъ токовъ.

ДѢЙСТВІЕ МАГНИТНАГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩЕСЯ ІОНЫ.

289. Электрической токъ въ проводникѣ есть не что иное, какъ движеніе электрически заряженныхъ частицъ. Эти частицы и испыты-

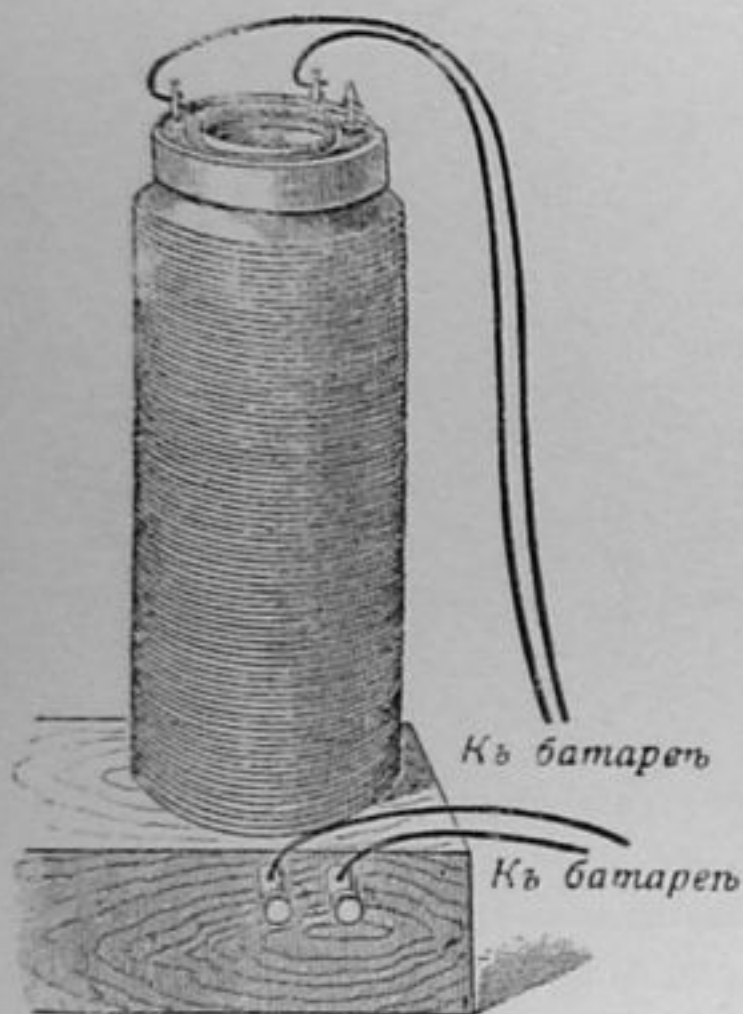


Рис. 207. Вращеніе раствора соли въ магнитномъ полѣ при прохожденіи тока.

тываютъ силовое дѣйствіе магнитнаго поля. Поэтому положеніе, высказанное въ § 284, мы можемъ выразить еще въ такой формѣ:

Вслѣдствіе магнитнаго состоянія мірового эѳира электрически заряженныя частицы при своемъ движеніи въ магнитномъ полѣ испытываютъ силовое дѣйствіе. Эта сила перпендикулярна къ направленію движенія и къ направленію силовыхъ линій; она тѣмъ больше, 1) чѣмъ сильнѣе поле, 2) чѣмъ больше слагающая движенія, перпендикулярная къ направленію поля, и 3) чѣмъ больше зарядъ частицы.

Силовое дѣйствіе магнитнаго поля на движущіяся электрически заряженныя частицы обнаруживается съ особенной отчетливостью въ описанныхъ выше явленіяхъ отклоненія катодныхъ и каналовыхъ лучей (§§ 148 и 161). Но и кромѣ этого многочисленными опытами

можно показать, что въ проводникѣ съ токомъ силовое дѣйствіе въ дѣйствительности испытываютъ лишь движущіеся іоны.

Кольцеобразный каналъ, дно котораго сдѣлано изъ стекла или иного изолятора, а стѣнки — изъ тонкихъ мѣдныхъ полосъ, наполнимъ какимъ-либо электролитомъ, на примѣръ, растворомъ мѣднаго купороса, и пропустимъ черезъ него токъ, пользуясь въ качествѣ электродовъ мѣдными стѣнками канала. Если внутренней электродъ служить анодомъ, то положительные іоны идутъ наружу радіально, а отрицательные — внутрь, также радіально. Если переключить токъ, то измѣнятся и направленія движенія обоихъ родовъ іоновъ. Помѣстимъ этотъ каналъ надъ полюсомъ сильнаго электромагнита (рис. 207) такъ, чтобы магнитныя силовыя линіи проходили черезъ него снизу вверхъ. Оба рода іоновъ будутъ испытывать силовое дѣйствіе, перпендикулярное къ ихъ радіальному направленію движенія и обращенное въ одну и ту же сторону, такъ какъ они имѣютъ противоположныя заряды и противоположныя направленія движенія. Двигаясь подъ вліяніемъ этого импульса, іоны, благодаря тренію, увлекаютъ съ собою жидкость. Вслѣдствіе этого жидкость приходитъ въ движеніе и совершаетъ круговоротъ по каналу. Быстрое движеніе жидкости можно сдѣлать видимымъ издалека, помѣстивъ на нее маленькій деревянный поплавокъ, который будетъ кружиться по каналу.

Подобнымъ образомъ магнитное поле отклоняетъ также и іоны электрическихъ токовъ въ газахъ. Оно дѣйствуетъ совершенно такъ же, какъ токъ воздуха, продуваемого перпендикулярно къ пути разряда и къ силовымъ линіямъ поля. Въ этомъ можно убѣдиться, если, на примѣръ, держать подковообразный магнитъ надъ положительной свѣтовой колонной тлѣющаго разряда, или если помѣстить между полюсами магнита свѣтовую дугу. Если магнитъ очень силенъ, то такимъ „магнитнымъ способомъ“ можно „потушить“ дугу. Это дѣйствіе магнитнаго поля примѣняется въ пламенныхъ дуговыхъ лампахъ. Какъ изображено на рис. 119, оба угля въ такой лампѣ поставлены наклонно внизъ, и можно было бы думать, что свѣтовая дуга здѣсь будетъ непрерывно увлекаться вверхъ подъ вліяніемъ восходящаго тока горячаго воздуха, какъ въ рогообразномъ громоотводѣ (рис. 118). Этого не происходитъ именно вслѣдствіе дѣйствія магнитнаго поля сильнаго тока, питающаго дугу; какъ мы видѣли въ опытѣ со скользящей шиной, это поле стремится отдалить части проводника

съ токомъ по возможности наружу. И въ рогообразномъ громоотводѣ магнитное поле оказываетъ свое вліяніе, но здѣсь оно толкаетъ свѣтовую дугу въ томъ же направленіи, какъ и воздушное теченіе, т.-е. вверхъ. Въ пламенныхъ лампахъ это дѣйствіе поля тока часто еще усиливаютъ помощью небольшого магнита, полюса котораго обращены къ обѣимъ сторонамъ свѣтовой дуги, а силовыя линіи направлены въ ту же сторону, какъ и силовыя линіи тока дуги.

Весьма интересное явленіе наблюдается при образованіи свѣтовой дуги въ радіальномъ направленіи между кольцеобразнымъ уголь-

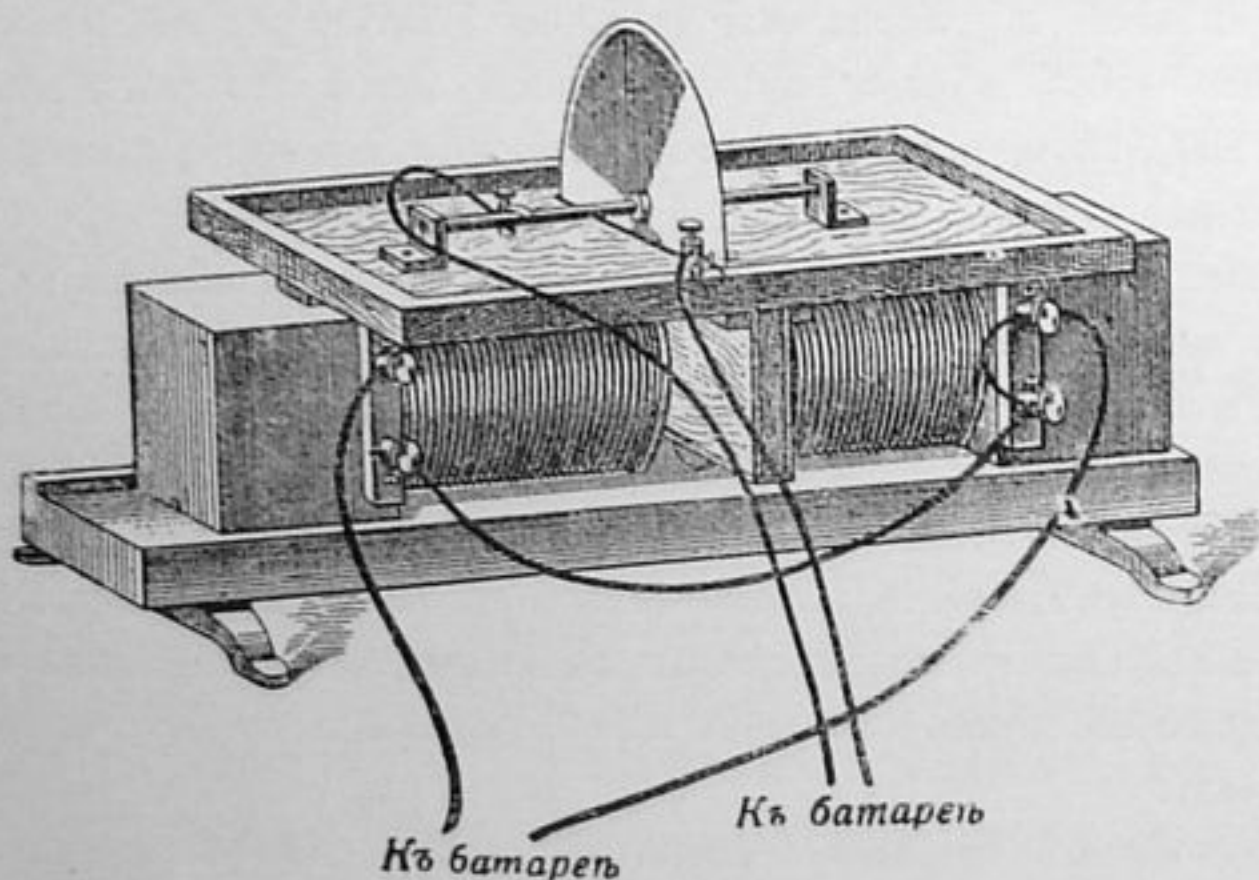


Рис. 208. Колесо Барлоу.

нымъ электродомъ и находящимся въ центрѣ этого кольца угольнымъ стержнемъ, если при этомъ черезъ плоскость кольца проходитъ перпендикулярное къ дугѣ не очень сильное магнитное поле. При возбужденіи этого магнитнаго поля свѣтовая дуга начинаетъ вращаться съ возрастающею скоростью и кажется огненнымъ дискомъ. Это явленіе объясняется такъ же, какъ и описанное выше вращеніе раствора мѣднаго купороса.

Давленіемъ электроновъ, находящихся въ магнитномъ полѣ, можно привести во вращеніе металлической дискъ. Это явленіе можно показать на такъ называемомъ колесѣ Барлоу (Barlow) — мѣдномъ дискѣ, который можетъ вращаться между полюсами сильного электромагнита (рис. 208). По оси диска скользитъ пружинный контактъ, который подводитъ токъ. Край диска внизу погруженъ въ

ртутную ванну, съ которою соединенъ второй проводъ. Если замкнуть батарею, то отъ центра диска въ радіальномъ направленіи къ краю пойдетъ токъ, и дискъ тотчасъ же начнетъ вращаться въ магнитномъ полѣ, подобно раствору мѣднаго купороса и свѣтовой дугѣ въ описанныхъ выше опытахъ. Это вращательное движеніе можетъ быть объяснено только тѣмъ, что и въ металлѣ электрической токъ представляетъ собою движеніе заряженныхъ матеріальныхъ частицъ, испытывающихъ силовое дѣйствіе отъ магнитнаго поля. Эти частицы (электроны) очень скоро сталкиваются съ густо распределенными атомами твердой мѣди, при чемъ токъ не можетъ замѣтно отклониться отъ своего пути, а самый дискъ, подъ вліяніемъ непрерывныхъ ударовъ, приходитъ въ движеніе.

ЯВЛЕНИЕ ГОЛЛА.

290. Если черезъ прямоугольную полосу однороднаго металла равномерной толщины проходитъ электрической токъ въ ея продольномъ направленіи, то, въ силу симметріи, двѣ взаимно противоположныя точки на краяхъ полосы должны имѣть одинаковые потенціалы. Поэтому, если приключить къ двумъ такимъ точкамъ измѣритель напряженій, то его отклоненіе будетъ нуль. Но если помѣстить полосу съ токомъ между полюсными башмаками сильнаго электромагнита такъ, чтобы магнитныя силовыя линіи проходили перпендикулярно черезъ плоскость полосы, то при возбужденіи поля измѣритель напряженій тотчасъ даетъ отклоненіе. При этомъ величина отклоненія, вообще, пропорціональна произведенію изъ силы магнитнаго поля и силы тока въ полосѣ. Это такъ называемое явленіе Голла (Hall) тоже обнаруживаетъ намъ дѣйствія магнитнаго поля на электроны, переносящіеся въ проводникѣ съ токомъ. Вслѣдствіе отклоненія электроновъ въ одномъ направленіи, одна сторона полосы заряжается положительно, а другая — отрицательно, и такимъ образомъ въ измѣрителѣ напряженій возникаетъ наблюдаемое отклоненіе.

Это объясненіе явленія Голла представляется крайне простымъ, если ограничиться такими указаніями общаго характера; но крайне трудно разяснить детали этого явленія. Если бы отрицательно заряженные электроны двигались въ металлѣ, черезъ который проходитъ токъ, среди твердыхъ атомовъ, подобно газу, диффундирующему въ пористомъ тѣлѣ, то они должны были бы во всѣхъ металлахъ отклоняться одинаковымъ образомъ, и при одинаковыхъ усло-

віяхъ наблюдаемое напряженіе должно было бы имѣть для всѣхъ металловъ одинаковыя знакъ и величину. Въ дѣйствительности оказывается, однако, не такъ, и металлы дѣлятся на двѣ группы, въ зависимости отъ знака явленія Голла. Для одной группы знакъ явленія совпадаетъ съ тѣмъ, котораго слѣдовало бы ожидать, согласно простой теоріи, но если бы электроны были заряжены не отрицательно, но положительно. Такъ какъ это невозможно, то мы должны заключить, что между положительными атомами металла и электронами существуютъ разнообразныя взаимодействія, которыя оказываютъ рѣшающее вліяніе на результатъ явленія Голла.

Особенно сильно обнаруживается явленіе Голла въ висмутѣ.

Въ связи съ явленіемъ Голла находятся еще нѣкоторыя другія сходныя явленія. Такъ, на примѣръ, если тщательно поддерживать въ металлической полосѣ постоянный токъ, то при возбужденіи магнитнаго поля измѣняется также напряженіе между зажимами, подводщими къ полосѣ токъ. Это явленіе часто называютъ „продольнымъ“ явленіемъ Голла въ отличіе отъ вышеописаннаго „поперечнаго“ явленія Голла. Такъ какъ отношеніе напряженія къ силѣ тока называется „сопротивленіемъ“ проводника, то это явленіе называютъ также „измѣненіемъ электрическаго сопротивленія въ магнитномъ полѣ“. Оно зависитъ несомнѣнно отъ какихъ-то вихревыхъ движеній, совершаемыхъ электронами подъ дѣйствіемъ магнитнаго поля. Это явленіе тоже наблюдается особенно рѣзко въ висмутѣ; какъ мы упоминали выше (§ 223), оно часто примѣняется для измѣренія магнитнаго поля.

ТЕОРІЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХЪ МАГНИТОВЪ.

291. Мы видѣли въ § 284, что съ соленоидомъ можно производить тѣ же опыты, что и съ прямымъ магнитомъ. Однако, существуетъ одно различіе между ними, котораго не слѣдуетъ упускать изъ виду: соленоидъ является магнитомъ лишь какъ цѣлое, тогда какъ магнитный стержень является магнитомъ въ любой своей части. Если магнитный стержень разломать, то, какъ указано въ § 227, каждый его кусокъ, въ свою очередь, представитъ собою магнитъ. Такимъ образомъ, мы приходимъ къ выводу, что каждая молекула желѣза представляетъ собою маленькій магнитъ, а весь магнитный стержень состоитъ изъ безчисленнаго множества маленькихъ одинаково ориентированныхъ молекулярныхъ магнитовъ. Возможно, что

намагниченное и ненамагниченное желѣзо различаются только тѣмъ, что въ первомъ молекулы ориентированы въ известномъ порядкѣ, тогда какъ во второмъ онѣ расположены совершенно беспорядочно. Это предположеніе можно обосновать небольшимъ опытомъ. Если стеклянную трубку, закрытую съ обѣихъ сторонъ пробками, набить (не плотно) стальными опилками, предварительно намагниченными въ полѣ сильнаго электромагнита, и встряхнуть эту трубку, то отдѣльные магнитики расположатся совершенно беспорядочнымъ образомъ, и стеклянная трубка поэтому не будетъ окружена снаружи магнитнымъ полемъ, какъ легко убѣдиться, поднося къ ней буссоль. Если мы теперь проведемъ вдоль трубки магнитный полюсъ, то маленькіе магнитики, по крайней мѣрѣ, частью, расположатся въ опредѣленномъ направленіи, и теперь буссоль покажетъ, что трубка намагничена. При этомъ она оказывается вполне сходной съ обыкновеннымъ стальнымъ стержнемъ, который также можно намагнитить, натирая его магнитомъ. В. Веберъ разработалъ теорію, по которой маленькіе молекулярные магниты въ желѣзѣ и въ стали имѣютъ постоянную силу. Въ желѣзѣ по прекращеніи дѣйствій намагничивающей силы эти магниты сами по себѣ снова располагаются въ беспорядкѣ; въ стали же они менѣе подвижны и, по крайней мѣрѣ отчасти, сохраняютъ направленіе, данное имъ намагничивающимъ полемъ. Эта теорія простѣйшимъ образомъ объясняетъ также и другія свойства ферромагнитныхъ тѣлъ, о которыхъ мы будемъ говорить ниже.

Но если каждая отдѣльная молекула желѣза въ цѣломъ представляетъ собою магнитъ постоянной силы, то естественно заключить, что каждая отдѣльная молекула желѣза представляетъ собою соленоидъ, по которому проходитъ постоянный электрической круговой токъ. Такой взглядъ на магниты, впервые высказанный Амперомъ, становится болѣе понятнымъ въ свѣтѣ электронной теоріи. Согласно этой теоріи, мы должны представлять себѣ, что молекула желѣза содержитъ нѣкоторое число электроновъ, которые вращаются всѣ вокругъ общей оси въ одномъ и томъ же направленіи. Такъ какъ при этомъ вращательномъ движеніи не происходитъ траты энергіи, совершенно такъ же, какъ при вращеніи планетъ вокругъ солнца, то „намагниченіе“ молекулы желѣза остается неизмѣннымъ. Въ молекулахъ же другихъ тѣлъ электроны не совершаютъ такого простаго вращательнаго движенія вокругъ одной общей оси; и этимъ объясняется особенность желѣза.

Въ теоріи Ампера передъ нами опять весьма явственно выступаетъ аксіальная природа магнитныхъ величинъ, такъ какъ направленіе намагниченія есть направленіе оси вращенія. Согласно этой теоріи, помимо электрическаго заряда не существуетъ никакой другой дѣйствующей связи между эфиромъ и матеріей, которую можно было бы назвать „магнитизмомъ“. Магнитное поле всегда представляетъ собою лишь одну сторону явленія, которое мы называемъ „электрическимъ токомъ“, и всѣ дѣйствія магнитнаго состоянія эфирна на вѣсомую матерію происходятъ лишь черезъ посредство движущихся электрическихъ зарядовъ.

ИНДУКТИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ВЪ ДВИЖУЩИХСЯ ПРОВОДНИКАХЪ.

292. Силовое дѣйствіе магнитнаго поля на движущіеся электрическіе заряды обнаруживается не только въ тѣхъ случаяхъ, когда іоны поддерживаются въ движеніи помощью электрическаго поля въ проводникѣ, но и тогда, когда движеніе вызывается какими-либо механическими силами. Когда мы на полюсѣ большого магнита помѣщаемъ описанный въ § 289 круговой каналъ, наполненный растворомъ мѣднаго купороса, или когда мы удаляемъ каналъ отъ полюса, то вмѣстѣ съ каналомъ мы двигаемъ черезъ магнитныя силовыя линіи также и находящіеся въ растворѣ іоны. Но, тогда какъ въ электрическомъ токѣ, въ которомъ при описанномъ опытѣ двигались іоны, положительныя и отрицательныя іоны двигались въ прямо противоположныя стороны, при перемѣщеніи всего сосуда оба рода іоновъ увлекаются въ одномъ и томъ же направленіи. Поэтому въ первомъ случаѣ магнитное поле толкаетъ движущіеся іоны всѣ въ одну сторону, такъ что получается механическое теченіе всей жидкости, во второмъ же случаѣ положительныя и отрицательныя іоны должны перемѣщаться въ противоположныя стороны, т.-е. долженъ возникнуть электрическій токъ.

При движеніи замкнутаго проводящаго кольца въ магнитномъ полѣ, въ кольцо возникаетъ электрическій токъ.

293. Для этого явленія характерно то обстоятельство, что электрическій токъ возникаетъ безъ электрическаго поля. Сила, которая гонитъ іоны, представляетъ собою не электрическое напряженіе, но „электродвижущую силу“ иного рода,—а именно силу, съ которой

магнитное поле дѣйствуетъ на движущіеся іоны. Для измѣренія этой электродвижущей силы лучше всего сравнить ея дѣйствіе съ дѣйствіемъ какого-либо электрическаго напряженія. Съ этой цѣлью представимъ себѣ, что кольцо въ одномъ мѣстѣ разрѣзано и къ обѣимъ поверхностямъ разрѣза приложено электрическое напряженіе; мы регулируемъ послѣднее такимъ образомъ, чтобы оно вызывало такой же токъ, какой возникалъ при движеніи кольца въ магнитномъ полѣ. Такое напряженіе мы назовемъ равнымъ или эквивалентнымъ электродвижущей силѣ магнитнаго поля въ движущемся кольцѣ.

Электрическое напряженіе, эквивалентное электродвижущей силѣ магнитнаго поля, мы можемъ измѣрить непосредственно, если перерѣжемъ въ опредѣленномъ мѣстѣ движущееся проводящее кольцо и поверхности разрѣза соединимъ съ зажимами электрометра. Въ перерѣзанномъ кольцѣ подѣ дѣйствіемъ магнитнаго поля перемѣщается лишь неизмѣримо малое число іоновъ или электроновъ, такъ какъ вслѣдствіе большой величины заряда іоновъ на концахъ кольца тотчасъ возникаютъ сильныя заряды, электрическое поле которыхъ противо-дѣйствуетъ силѣ магнитнаго поля. Если электрическое напряженіе между концами кольца эквивалентно электродвижущей силѣ магнитнаго поля, то оба дѣйствія на іоны взаимно уничтожаются, и іоны остаются въ покоѣ. Такимъ образомъ весьма скоро само собой устанавливается напряженіе, эквивалентное электродвижущей силѣ магнитнаго поля, и мы можемъ его прямо измѣрить электрометромъ. Характерно при этомъ то обстоятельство, что электрическое поле въ кольцеобразномъ проводникѣ существуетъ при отсутствіи электрическаго тока, такъ какъ сила магнитнаго поля компенсируетъ силу электрическаго поля. Подобныя же соотношенія мы встрѣчали въ термоэлектрическихъ и гальваническихъ цѣпяхъ (§ 220 и § 275; ср. также § 29).

Напряженіе, наблюдаемое между двумя концами незамкнутаго проводника, движущагося въ магнитномъ полѣ, называется индуктированной въ проводникѣ электродвижущей силой.

Чтобы удобнѣе было наблюдать то напряженіе, о которомъ здѣсь идетъ рѣчь, полезно взять не одно отдѣльное разомкнутое кольцо, но разомкнутую катушку изъ многихъ, скажемъ, n витковъ. Эти n витковъ представляютъ собою какъ бы n послѣдовательно соединенныхъ колецъ, и индуктированныя въ этихъ кольцахъ напря-

женія суммируются совершенно такъ же, какъ напряжения элементовъ гальванической батареи.

Напряжение, индуктируемое въ катушкѣ съ n оборотами при ея движеніи въ магнитномъ полѣ, въ n разъ больше электродвижущей силы, индуктируемой въ одномъ единственномъ оборотѣ.

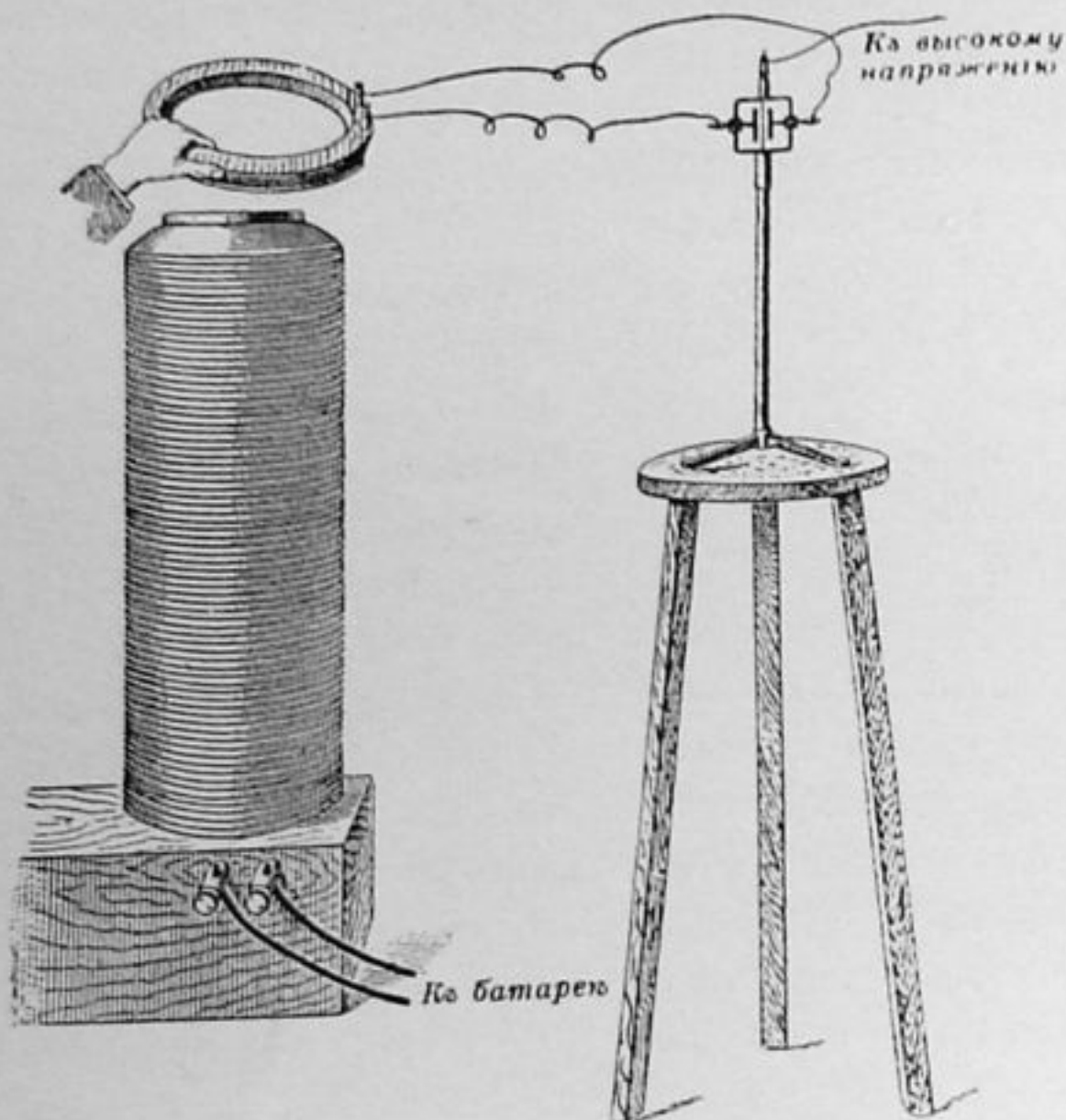


Рис. 209. Индуктированное напряжение въ катушкѣ, движущейся въ магнитномъ полѣ.

Если производить наблюдение съ помощью электрометра Ганкеля, устанавливающагося моментально (рис. 209), то можно замѣтить, что индуктируемое напряжение за короткое время движенія зависитъ отъ скорости движенія и силы магнитнаго поля. Чѣмъ быстрѣе движеніе, тѣмъ сильнѣе отклоненіе электрометра; отклоненіе достигаетъ наибольшей величины, когда катушка передвигается черезъ сильное поле непосредственно у магнитнаго полюса. При удаленіи катушки отъ полюса отклоненія электрометра противоположны отклоненіямъ, которыя наблюдаются, когда катушку приближаютъ къ полюсу. Ин-

дуктированные электродвижущія силы были открыты Фарадеемъ и имъ же впервые были точно изучены.

294. Если зажимы катушки мы соединимъ проводникомъ, то при движеніи катушки возникаетъ токъ, сила котораго равна, согласно закону Ома, частному отъ дѣленія индутированного напряженія на сопротивленіе всего проводника. Обозначимъ сопротивленіе катушки черезъ R' , сопротивленіе приключеннаго къ зажимамъ проводника черезъ R'' и индутированную электродвижущую силу черезъ V ; сила тока, слѣдовательно, равна $J = V : (R' + R'')$. Величину V можно разложить на два слагаемыя V' и V'' , при чемъ $V' = J \cdot R'$ представить собою „потерю напряженія“ въ катушкѣ, а $V'' = V - V' = J \cdot R''$ — напряженіе между зажимами. Направленіе электрическаго тока J въ катушкѣ таково, что ея магнитное поле ослабляетъ индутирующее поле, если она движется въ сторону возрастающей силы поля, и, обратно, усиливаетъ его при движеніи въ сторону убыванія силы поля. Итакъ, всѣ случаи подчиняются правилу: „индутированный токъ“ стремится препятствовать измѣненію того магнитнаго поля, которое онъ окружаетъ. Изъ закона, найденнаго въ § 284, слѣдуетъ теперь, что сила, дѣйствующая на катушку съ токомъ въ магнитномъ полѣ, всегда направлена противоположно движенію. Слѣдовательно, для движенія катушки должна быть затрачена работа. Мощность, сообщаемая при этомъ катушкѣ въ видѣ работы, равняется $U = V \cdot J$ ваттамъ; она поглощается катушкою и соединеннымъ съ нею проводомъ. Въ катушкѣ поглощается мощность $U' = V' \cdot J$, а въ проводъ поступаетъ мощность $U'' = V'' \cdot J$, при чемъ $U' + U'' = U$.

Если во внѣшнемъ проводѣ дѣйствуетъ электродвижущая сила V_a , то напряженіе V'' у зажимовъ должно уравнивать сумму V_a и омическаго напряженія $R'' \cdot J$, т.-е. $V'' = V_a + R'' \cdot J$. Сила тока J вычисляется изъ условія равновѣсія $V = V' + V'' = R' \cdot J + R'' \cdot J + V_a$; слѣдовательно, $J = (V - V_a) : (R' + R'')$. Знакъ электродвижущей силы V_a можетъ быть положительнымъ и отрицательнымъ. Если онъ отрицательный, то рассматриваемыя электродвижущія силы даютъ мощность, слагающуюся съ мощностью $U = V \cdot J$ и вмѣстѣ съ нею доставляющую въ катушку и въ проводъ теплоту тока $(R' + R'') \cdot J^2$. Если же этотъ знакъ положительный, то электродвижущія силы поглощаютъ, какъ описано въ § 281, мощность $V_a \cdot J = U_a$, а остающаяся мощность $U - U_a$ превращается въ теплоту тока. Но это вѣрно лишь въ томъ случаѣ, если $V_a < V$. Если же напряженіе V_a больше

индуктированной въ катушкѣ электродвижущей силы V , то токъ J мѣняетъ знакъ, и внѣшняя электродвижущая сила доставляетъ мощность $U_a = V_a \cdot J$; часть этой мощности, именно $U = V \cdot J$, получаетъ катушка, а остальная часть $U_a - U$ обращается въ теплоту тока. Легко понять, что дѣлается съ мощностью U , если вспомнить, что при томъ направленіи тока, которое онъ имѣетъ въ этомъ случаѣ, сила магнитнаго поля дѣйствуетъ на катушку въ направленіи ея движенія. Такимъ образомъ, при движеніи катушки мощность $U = V \cdot J$ будетъ получена въ формѣ работы.

Когда катушка съ токомъ J движется въ магнитномъ полѣ, то въ зависимости отъ направленія тока либо въ ней работа переходитъ въ форму электрической энергіи, либо же, наоборотъ, электрическая энергія переходитъ въ работу. Если индуктированное напряженіе равно V , то количество превращаемой мощности равняется $U = V \cdot J$.

Это можно выразить еще такъ: движущаяся въ магнитномъ полѣ катушка, по которой течетъ токъ, дѣйствуетъ, въ зависимости отъ направленія тока, либо какъ генераторъ, либо какъ моторъ.

ЗАКОНЫ ИНДУКЦИИ ВЪ МАГНИТНОМЪ ПОЛѢ.

295. Соединимъ концы проволоки съ чувствительнымъ струннымъ электрометромъ или же со струннымъ гальванометромъ, имѣющимъ большое сопротивленіе (вольтметромъ). Туго натянувъ проволоку, будемъ ее перемѣщать въ щели между полюсными башмаками сильнаго электромагнита, перпендикулярно къ длинѣ проволоки и къ магнитнымъ силовымъ линіямъ. При помощи этого простаго прибора мы можемъ установить слѣдующіе два закона, найденные уже Фарадеемъ.

Первый законъ индукціи: электрическое напряженіе, индуктируемое въ проволоку при ея движеніи черезъ магнитное поле, при прочихъ неизмѣнныхъ условіяхъ (длина проволоки, скорость, сила поля) не зависитъ отъ матеріала и толщины проволоки.

Второй законъ индукціи: при прочихъ равныхъ условіяхъ индуктированное напряженіе пропорціонально скорости, съ которою проволока движется перпендикулярно къ своей длинѣ и къ магнитнымъ силовымъ линіямъ.

При движеніи проволоки параллельно силовымъ линіямъ напряженіе не индуцируется вовсе; электроны испытываютъ въ магнитномъ полѣ силовое дѣйствіе только въ томъ случаѣ, если они движутся перпендикулярно къ силовымъ линіямъ. Индуцированнаго напряженія не получается, если двигать проволоку въ направленіи ея длины; въ самомъ дѣлѣ, такъ какъ электродвижущая сила, съ которой на электроны дѣйствуетъ магнитное поле, перпендикулярна къ направленію движенія, то она не даетъ слагающей, параллельной проволокаѣ. Такимъ образомъ, величина индуцированнаго напряженія зависитъ лишь отъ той слагающей скорости, которая перпендикулярна къ направленію поля и къ направленію проволоки. Второй законъ короче выражается такъ: индуцированное напряженіе пропорціонально скорости, съ которою проволока пересѣкаетъ магнитныя силовыя линіи.

ИНДУКЦІЯ ИЛИ МАГНИТНЫЙ СИЛОВОЙ ПОТОКЪ.

296. Если при только-что описанномъ опытѣ мы будемъ передвигать проволоку черезъ магнитное поле сначала медленно, а затѣмъ быстро, то въ первомъ случаѣ струнный гальванометръ покажетъ малое, но продолжительное напряженіе, во второмъ же случаѣ индуцированное напряженіе велико, но длится короткое время. Если индуцированное напряженіе за все время движенія постоянно, то по второму закону индукціи произведеніе изъ напряженія на промежутокъ времени, въ теченіе котораго оно длится, имѣетъ въ обоихъ случаяхъ одинаковую величину. Вообще говоря, индуцированное напряженіе не остается постояннымъ за все время движенія. Но если мы весь этотъ промежутокъ времени разобьемъ на множество маленькихъ частей, такъ чтобы въ каждый маленькій промежутокъ напряженіе можно было считать постояннымъ, то изложенное нами правило можно будетъ приложить и къ общему случаю. Если умножимъ величину каждаго элемента времени на соответствующее значеніе напряженія и возьмемъ сумму всѣхъ такихъ произведеній, то полученная „сумма напряженій по времени“ не будетъ зависѣть отъ скорости, если только проволока движется каждый разъ черезъ одну и ту же часть одного и того же поля.

Понятіе суммы по времени играетъ важную роль также и въ механикѣ; когда, мы, напримѣръ, приводимъ въ движеніе кегельный шаръ, то скорость, которой онъ достигаетъ въ концѣ движенія,

пропорціональна произведенію изъ силы на продолжительность дѣйствія силы или же, если сила, дѣйствующая во время бросанія, не остается постоянной, пропорціональна суммѣ силъ по времени. Въ механикѣ сумма силъ по времени называется „ударомъ“ или „силой удара“; скорость, пріобрѣтаемая шаромъ, пропорціональна удару. Силы удара удобно измѣрять при помощи баллистическаго маятника. Это — маятникъ, періодъ качаній котораго значительно превышаетъ продолжительность измѣряемаго удара. Ударъ, который желаютъ измѣрить, напримѣръ, ударъ ружейной пули, направляютъ на маятникъ. Первое его отклоненіе пропорціонально удару.

Такъ какъ индуктированное въ проволокѣ напряженіе пропорціонально силѣ, которая дѣйствуетъ на электроны при движеніи въ магнитномъ полѣ, то сумма напряженій по времени пропорціональна удару, дѣйствующему на электроны, и потому мы ее будемъ называть просто „ударомъ напряженія“. Этотъ ударъ измѣряется при помощи баллистическаго электрометра или вольтметра. Это — инструментъ съ относительно тяжелою подвижною системою, періодъ колебаній которой, во всякомъ случаѣ, великъ по сравненію съ продолжительностью измѣряемаго удара напряженія. Подвижная система приводится ударомъ въ движеніе, подобно баллистическому маятнику, и первое ея отклоненіе пропорціонально измѣряемому удару напряженія. Если передвигать проволоку по опредѣленному сѣченію опредѣленнаго магнитнаго поля, то соединенный съ ней баллистическій вольтметръ даетъ всегда одно и то же первое отклоненіе; этимъ доказывается законъ постоянства суммы напряженій по времени.

При передвиженіи проволоки по поверхности, пересекающей магнитное поле, индуктированный ударъ напряженія не зависитъ ни отъ скорости движенія, ни отъ вещества проволоки.

Ударъ напряженія зависитъ исключительно отъ величины магнитнаго поля, пересекаемаго поверхностью, которую описываетъ проволока. Онъ даетъ намъ простѣйшій способъ измѣренія магнитнаго поля по его силовымъ дѣйствіямъ.

Магнитная индукція. Ударъ напряженія, наблюдаемый между концами проволоки при ея движеніи по нѣкоторой поверхности, служитъ мѣрою магнитнаго поля, пронизывающаго всю эту поверхность. Такъ измѣренную величину называютъ подною магнитною индукціею черезъ данную поверх-

ность или же полнымъ магнитнымъ силовымъ потокомъ.

Единицей магнитной индукціи или магнитнаго силового потока въ узаконенной системѣ мѣръ служитъ вольтъ-секунда.

Чтобы найти удѣльную величину магнитнаго поля, или удѣльную индукцію, нужно измѣрить полную индукцію черезъ малую поверхность и раздѣлить ее на величину этой поверхности. Единицей удѣльной магнитной индукціи, которую часто называютъ также просто магнитной индукціей, является вольтъ-секунда на квадратный сантиметръ.

Какъ для измѣренія электрическихъ полей мы имѣемъ два независимые другъ отъ друга метода—методъ напряженія (въ вольтахъ) и методъ возбужденія (въ кулонахъ), точно такъ же и для магнитнаго поля, кромѣ силы поля, измѣряемой въ амперъ-виткахъ, мы имѣемъ еще второе независимое опредѣленіе; при этомъ ясно, что магнитная индукція также есть векторіальная величина. Если двигать проволоку по поверхности, параллельной силовымъ линиямъ, то индукція оказывается равной нулю; въ перпендикулярной поверхности величина индукціи на одинъ квадратный сантиметръ будетъ наибольшей; въ наклонномъ же направленіи ударъ напряженія на квадратный сантиметръ оказывается меньше.

Направленіе магнитнаго силового потока совпадаетъ съ направлениемъ нормали къ той поверхности, вдоль которой нужно перемѣщать проволоку, чтобы получить въ разсматриваемомъ мѣстѣ максимальный ударъ напряженія на квадратный сантиметръ.

Положительнымъ направлениемъ нормали считается то направленіе, въ которомъ нужно смотрѣть, чтобы индуктированная электродвижущая сила казалась направленной слѣва направо при движеніи проволоки сверху внизъ. Если повернуть замкнутую катушку изъ положенія, параллельнаго силовымъ линиямъ, въ положеніе, перпендикулярное къ нимъ, то индуктированный токъ въ ней идетъ справа налѣво, если смотрѣть на него по положительному направленію силового потока (рис. 210). При такомъ опредѣленіи направленіе силового потока совпа-

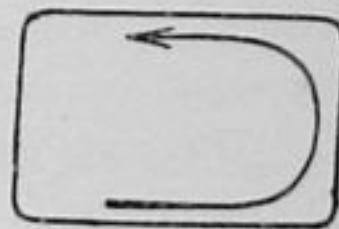


Рис. 210. Направленіе магнитнаго силового потока.

Стрѣлка указываетъ направленіе тока, индуктируемаго въ проводочномъ прямоугольнике при поворотѣ его въ положеніе, перпендикулярное къ полю. Силовой потокъ проходитъ черезъ плоскость рисунка сверху.

дасть съ направлениемъ силы поля (§ 244) и съ направлениемъ, указываемымъ положительнымъ полюсомъ магнитной стрѣлки, такъ какъ магнитное поле тока, индуктированнаго въ замкнутой катушкѣ, стремится препятствовать измененію окружаемаго катушкой поля. Изъ опредѣленія этого направленія можно видѣть, что магнитный силовой потокъ, подобно силѣ магнитнаго поля, имѣетъ характеръ ротора.

Удѣльную индукцію магнитнаго поля, измеренную въ вольтъ-секундахъ на квадратный сантиметръ, мы въ послѣдующемъ будемъ всегда обозначать буквою *B*.

ЛИНИИ МАГНИТНАГО СИЛОВОГО ПОТОКА.

297. Магнитное поле можно представить графически при помощи линій, которыя своимъ направлениемъ даютъ повсюду на-

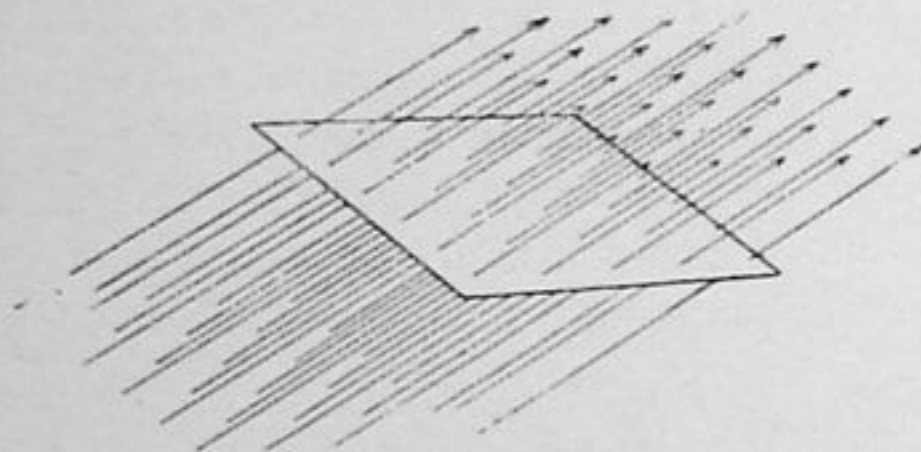


Рис. 211. Изображеніе магнитнаго силового потока при помощи силовыхъ линій.

правленіе поля, а своею густотой опредѣляютъ удѣльную индукцію въ данномъ мѣстѣ. Если эти линіи проведены такъ, что черезъ каждый элементъ поверхности, черезъ который проходитъ силовой потокъ, равный одной вольтъ-секундѣ, проходитъ въ среднемъ одна линія, то каждую линію мы будемъ разсматривать какъ единицу силовой линіи. Чтобы сдѣлать это изображеніе болѣе точнымъ, нужно проводить линіи гуще, такъ чтобы одна линія приходилась, напримѣръ, на элементъ поверхности, на которомъ индукція составляетъ $\frac{1}{1000}$ или $\frac{1}{1000000}$ вольтъ-секунды. Каждую изъ такихъ линій (рис. 211) мы должны тогда считать соответственно за $\frac{1}{1000}$ или за $\frac{1}{1000000}$ единичной линіи.

Съ помощью линій силового потока можно формулировать законы индукціи Фарадэя весьма нагляднымъ образомъ:

Напряженіе, индуктированное въ движущемся проводникѣ, равняется числу магнитныхъ силовыхъ линій, пересѣкаемыхъ имъ за секунду.

При одинаковой скорости проводникъ пересѣкаетъ большее число линій, если онъ движется по поверхности, перпендикулярной къ полю; когда же проводникъ движется по поверхности, параллельной силовымъ линіямъ, то онъ ни одной изъ нихъ не пересѣкаетъ.

ЛИНИИ МАГНИТНАГО СИЛОВОГО ПОТОКА СУТЬ ЛИНИИ ЗАМКНУТЫЯ.

298. Придавъ проводнику надлежащую форму, можно заставить его описать замкнутую поверхность. Простымъ примѣромъ можетъ служить проволока, согнутая въ формѣ прямоугольника безъ одной стороны или же въ формѣ полуокружности. Если оба конца такой дуги держать неподвижно и вращать ее вокругъ прямой, соединяющей эти концы, то дуга опишетъ замкнутую поверхность. Если это движеніе происходитъ въ магнитномъ полѣ, то индуктированное напряженіе между неподвижными зажимами будетъ то положительнымъ, то отрицательнымъ. Болѣе подробное экспериментальное изслѣдованіе показываетъ, что при этомъ положительный ударъ напряженія имѣетъ точно такую же величину, какъ и отрицательный; если все движеніе происходитъ съ достаточной быстротой, то баллистическій инструментъ не обнаруживаетъ никакого отклоненія.

Третій законъ индукціи: Если проводникъ описываетъ въ магнитномъ полѣ замкнутую поверхность, возвращаясь въ заключеніе въ свое начальное положеніе, то общая сумма по времени напряженій, индуктированныхъ при этомъ движеніи, равняется нулю.

Когда проводникъ описываетъ нѣкоторую поверхность, то ударъ напряженія равняется числу магнитныхъ силовыхъ линій, проходящихъ черезъ эту поверхность; слѣдовательно:

Число магнитныхъ силовыхъ линій, входящихъ въ замкнутую поверхность черезъ одну ея сторону, всегда равно числу силовыхъ линій, выходящихъ изъ поверхности съ другой ея стороны.

Такимъ образомъ, никогда не случается, чтобы линіи магнитнаго силового потока въ какомъ-либо мѣстѣ пространства заново начинались или же прекращались.

Основной законъ магнитнаго силового потока. Линіи магнитнаго силового потока не имѣютъ ни начала ни конца: онѣ представляютъ собою линіи замкнутыя.

ИЗМѢРЕНІЕ МАГНИТНАГО СИЛОВОГО ПОТОКА.

299. Для измѣренія магнитнаго поля лучше всего воспользо-ваться катушкой, обмотка которой занимаетъ мало мѣста по сравненію съ ограничиваемой ею площадью. Катушка должна легко поворачиваться на 180° вокругъ оси, лежащей въ плоскости витковъ. При этомъ движеніи каждая изъ силовыхъ линій, проходящихъ черезъ

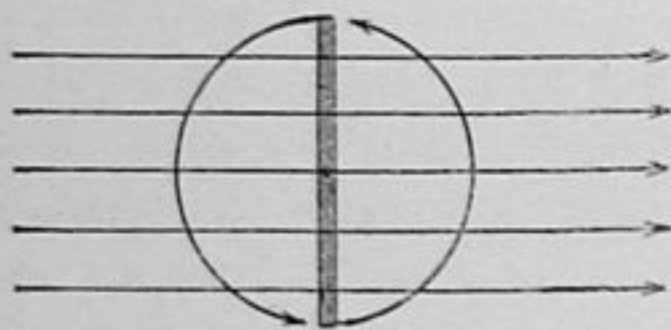


Рис. 212. Пересѣченіе силовыхъ линій
[при поворотѣ катушки на 180° .

ограничиваемую катушкою поверхность, пересѣкается два раза. Если мы черезъ v обозначимъ подлежащее измѣренію число силовыхъ линій, проходящихъ черезъ указанную поверхность, то число пересѣчен-ныхъ силовыхъ линій равняется $2v$ (рис. 212). Если, далѣе, число вит-

ковъ катушки равняется n , а индуктированный при поворотѣ ударъ напряженія, измѣренный баллистическимъ вольтметромъ, равенъ Q , то

$$Q = 2 n \cdot v,$$

$$v = \frac{Q}{2 n}.$$

Обозначимъ, далѣе, черезъ q площадь, ограничиваемую катушкой; слагающая магнитнаго силового потока, перпендикулярная къ поверхности витковъ, равняется

$$B_N = \frac{v}{q}.$$

Остается, слѣдовательно, только проградуировать въ вольтъ-секундахъ баллистическій вольтметръ, помощью котораго измѣряется Q . Какъ это дѣлать, мы покажемъ на конкретномъ примѣрѣ измѣренія земнаго поля.

СИЛОВОЙ ПОТОКЪ ЗЕМНОГО ПОЛЯ.

300. Чтобы измѣрить силовой потокъ земного поля по описанному сейчасъ методу, возьмемъ круглое деревянное кольцо, обмотанное многими оборотами тонкой проволоки, какъ на рис. 209. Оба конца этой катушки соединимъ съ гальванометромъ, который служить здѣсь въ качествѣ вольтметра. При всякомъ движеніи катушки мы замѣчаемъ отклоненія стрѣлки, такъ какъ при этомъ пе-

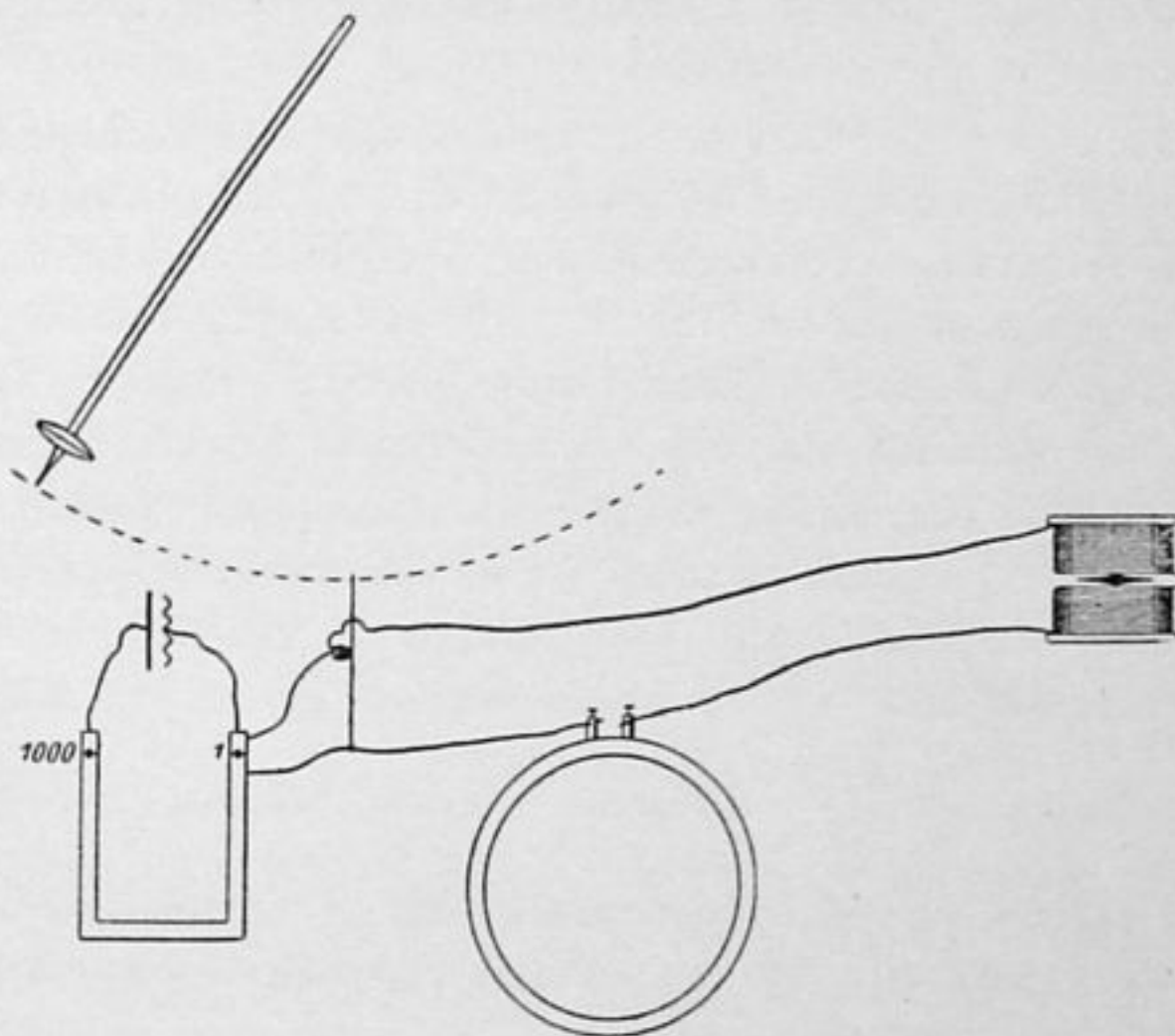


Рис. 213. Градуированіе баллистическаго гальванометра въ вольт-секундахъ. (Схема соединеній).

ресѣкаются линіи земного поля. Если быстро повернуть катушку на 180° , то получимъ искомое баллистическое отклоненіе.

Для градуированія гальванометра помѣстимъ катушку на столъ и включимъ въ цѣпь, содержащую гальванометръ, небольшое напряжение V (рис. 213). Для полученія этого напряжения замкнемъ гальванической элементъ извѣстнаго напряжения на большое сопротивленіе (штепсельный реостатъ) и отведемъ параллельно опредѣленную малую часть этого сопротивленія. Такимъ путемъ легко получить напряжение V въ нѣсколько милливольтъ, которое можно варіировать. Напряжение V можно коротко замкнуть толстой мѣдной скобкой. Если эта

скобка включена, то напряженіе у гальванометра равно нулю или, во всякомъ случаѣ, безконечно мало по сравненію съ V . Для включенія и выключенія скобки служитъ маятникъ, который при своихъ качаніяхъ послѣдовательно производитъ включеніе и выключеніе. Напряженіе V приложено къ гальванометру въ теченіе времени τ одного качанія маятника и вызываетъ баллистическое отклоненіе, которое мы и отсчитываемъ. Такъ какъ промежутокъ τ нетрудно опредѣлить, то мы можемъ, слѣдовательно, вычислить ударъ напряженія $V \cdot \tau$; такимъ образомъ, варьируя V , мы можемъ всю шкалу гальванометра градуировать на вольтъ-секунды.

Подобнаго рода опытъ далъ, напримѣръ, что баллистическія отклоненія взятаго гальванометра пропорціональны ударамъ напряженія, при чемъ отклоненіе, соотвѣтствовавшее 1 милливольтъ-секундѣ, равнялось 6 дѣленіямъ шкалы. Послѣ того какъ мѣдная скобка была включена окончательно и проволочная катушка повернута на 180° вокругъ вертикальной оси, при чемъ плоскость витковъ была перпендикулярна къ направленію сѣверъ-югъ, получилось баллистическое отклоненіе въ 22 дѣленія шкалы = 3,7 милливольтъ-секундамъ. Такъ какъ взятая катушка имѣла 1300 оборотовъ, то число силовыхъ линий, проходившихъ черезъ ограничиваемый ею кругъ, равнялось

$$v = \frac{3,7 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1300} = 1,42 \cdot 10^{-6} \text{ вольтъ-секундъ.}$$

Средній радіусъ катушки былъ равенъ 32 см.; ограничиваемая ею поверхность равнялась 800 кв. см. Для горизонтальной слагающей земного поля получилась величина

$$B_h = \frac{1,42}{800} \cdot 10^{-6} = 0,18 \cdot 10^{-8} \frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{кв. см.}}$$

Подобнымъ образомъ была опредѣлена вертикальная составляющая земного поля. Для этого катушка была положена своимъ основаніемъ на столъ и повернута на 180° . Измѣреніе показало, что

$$B_v = 0,44 \cdot 10^{-8} \frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{кв. см.}}$$

Весь силовой потокъ равенъ $B = \sqrt{B_v^2 + B_h^2} = 0,48 \cdot 10^{-8} \frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{кв. см.}}$;

уголъ наклоненія φ получается изъ уравненія $\text{tg } \varphi = \frac{B_v}{B_h}$, которое даетъ $\varphi = 67,7^\circ$.

ВИХРЕВЫЕ ТОКИ.

301. При движеніи большого проводника, на примѣръ, металлической пластинки, въ магнитномъ полѣ, электродвижущая сила поля дѣйствуетъ на его іоны или электроны такимъ же образомъ, какъ и въ случаѣ проволоки. При этомъ возникаютъ токи, замкнутые въ самой проводящей массѣ, т.-е. возникаютъ въ нѣкоторомъ родѣ вихревые движенія электроновъ. Эти вихревые токи¹⁾, въ виду особенности ихъ расположенія, не могутъ быть открыты амперметромъ; но ихъ можно ясно обнаружить инымъ путемъ.

Вихревые токи прекрасно обнаруживаются опытомъ Араго (Arago), опубликованнымъ еще до фундаментальныхъ работъ Фарадея. Надъ серединой крѣпкой круглой мѣдной пластинки, которая при помощи центробѣжной машины можетъ быть приведена въ быстрое вращеніе, подвѣшена магнитная стрѣлка. Между мѣднымъ дискомъ и магнитной стрѣлкой помѣщаютъ толстую стеклянную пластинку, чтобы возникающія при вращеніи воздушныя теченія не достигали магнитной стрѣлки. При вращеніи диска магнитная стрѣлка начинаетъ также вращаться, сначала медленно, а затѣмъ все быстрѣе, какъ бы увлекаемая движеніемъ вполне изолированного отъ нея мѣднаго диска. Араго назвалъ это явленіе „магнетизмомъ вращенія“; позже оно было объяснено Фарадеемъ, какъ слѣдствіе индуцированныхъ вихревыхъ токовъ. Согласно законамъ, изложеннымъ въ § 294, въ тѣхъ частяхъ диска, которыя приближаются къ магнитному полюсу, индуцируются токи, магнитное поле которыхъ отталкиваетъ полюсъ, въ частяхъ же, удаляющихся отъ магнитнаго полюса, индуцируются вихревые токи, поле которыхъ притягиваетъ полюсъ. Вслѣдствіе этого магнитная стрѣлка и увлекается движеніемъ диска.

Металлическая пластинка, въ которой циркулируютъ вихревые токи, также испытываетъ силовое дѣйствіе; именно, магнитъ, отъ котораго исходитъ индуцирующее поле, стремится задержать ея движеніе. Сильное магнитное поле можетъ производить поразительно сильное тормозящее дѣйствіе. Когда подвѣшенная въ видѣ маятника толстая мѣдная пластинка (рис. 214) качается между полюсами электромагнита, то при возбужденіи магнетизма она внезапно застреваетъ между его полюсами и чрезвычайно медленно движется къ своему наиболѣе низкому положенію, какъ если бы она находилась въ весьма

¹⁾ Часто ихъ называютъ также токами Фуко.

вязкой жидкости. Теряющаяся при этомъ энергія движенія пластинки переходитъ черезъ вихревые токи въ теплоту. Описанный приборъ называется „маятникомъ Вальтенгофена“ (Waltenhofen) (рис. 214).

Успокаивающее дѣйствіе вихревыхъ токовъ часто примѣняется въ измѣрительныхъ инструментахъ для прекращенія нежелательныхъ качаній стрѣлки (другой способъ успокоенія — посредствомъ воз-

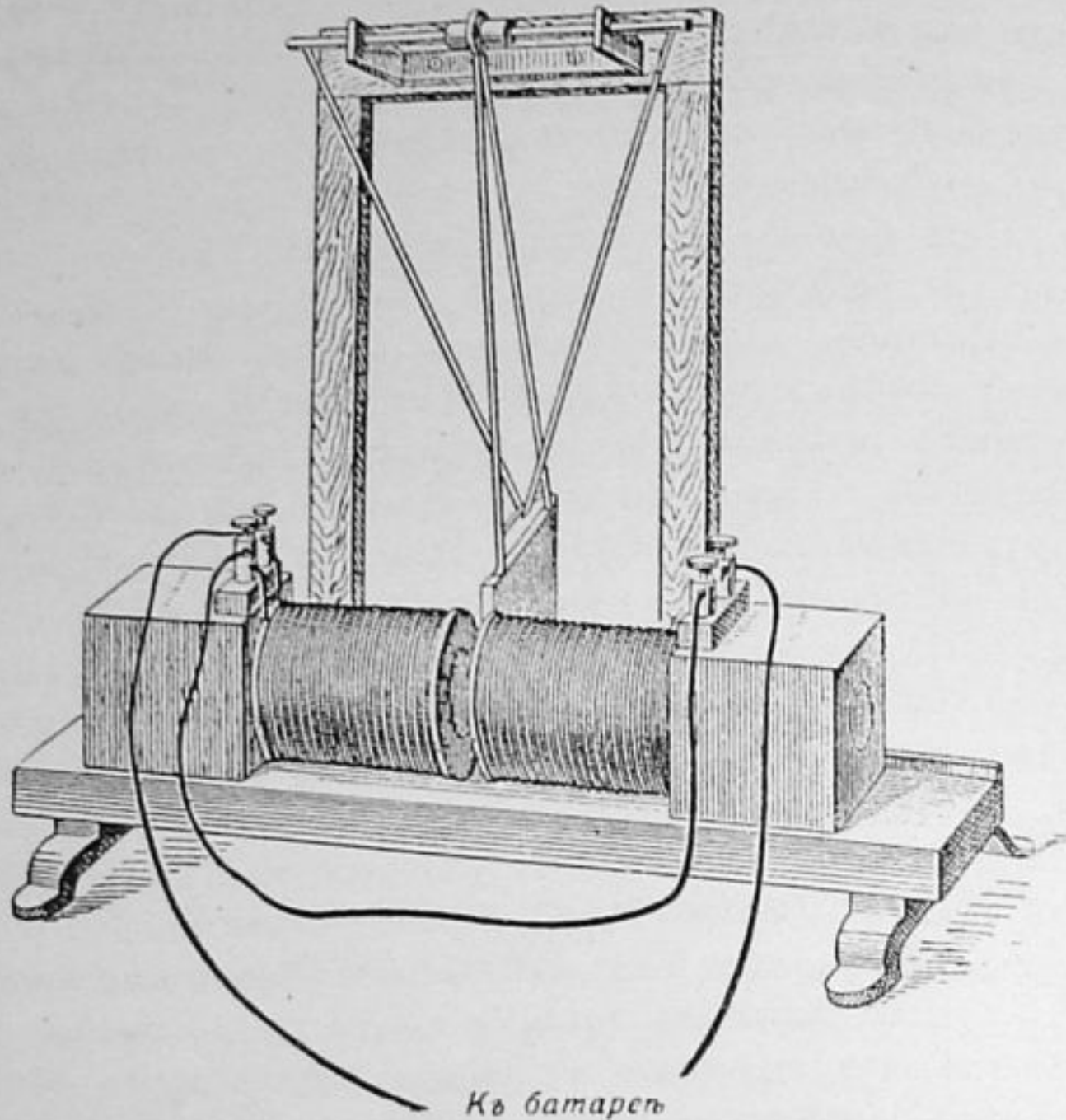


Рис. 214. Маятникъ Вальтенгофена.

духа или жидкости — нерѣдко бываетъ менѣе удобенъ). На оси указателя укрѣпляется круглая металлическая пластинка, и рядомъ помѣщается сильный стальной магнитъ, между полюсами котораго оставлена лишь узкая щель (ср. рис. 143) такимъ образомъ, чтобы край пластинки двигался въ этой щели, не задѣвая магнита. При вращеніи пластинки возникаютъ вихревые токи, которые неизмѣнно оказываютъ равномерное успокаивающее дѣйствіе.

УСПОКОЕНІЕ ГАЛЬВАНОМЕТРА Д'АРСОНВАЛЯ.

302. Въ инструментѣ д'Арсонваля магнитное поле должно быть очень сильно, и потому его индукціонныя дѣйствія также сильны. Если вращающаяся катушка инструмента замкнута, то она сама собой успокаивается электромагнитнымъ путемъ, и указатель быстро останавливается. Наоборотъ, если катушка разомкнута, то указатель колеблется, подобно указателю вѣсовъ. Такъ какъ сила индуктированныхъ токовъ существенно зависитъ отъ сопротивленія катушки, то отъ него же зависитъ и затуханіе. Если инструментъ обладаетъ весьма малымъ внутреннимъ сопротивленіемъ, то катушка, послѣ короткаго замыканія, остается въ томъ мѣстѣ, гдѣ ее застало замыканіе, и измѣреніе въ такомъ случаѣ не можетъ быть произведено. Если же катушка замкнута на очень большое сопротивленіе, то затуханіе незначительно, какъ и при разомкнутой катушкѣ. Существуетъ определенное наилучшее сопротивленіе, при которомъ инструментъ устанавливается скоро и безъ колебаній — „аперіодически“. При построеніи инструментовъ д'Арсонваля необходимо принять это во вниманіе. Если катушка имѣетъ шунтъ, какъ это бываетъ всегда въ амперметрахъ для большихъ силъ тока, то изъ катушки и проводниковъ, связанныхъ съ шунтомъ, можно составить какъ разъ нужное сопротивленіе, чтобы получился инструментъ, отличающійся весьма быстрымъ и постояннымъ затуханіемъ.

Иначе обстоитъ дѣло съ лабораторными инструментами, не имѣющими шунтовъ, при измѣреніи весьма малыхъ токовъ. Ихъ затуханіе можетъ въ сильной степени зависѣть отъ внѣшняго сопротивленія. На это слѣдуетъ обращать особенное вниманіе при употребленіи гальванометра д'Арсонваля въ качествѣ баллистическаго аппарата, такъ какъ въ послѣднемъ величина перваго отклоненія существенно зависитъ отъ затуханія колебаній. Поэтому инструментъ слѣдуетъ градуировать при томъ же внѣшнемъ сопротивленіи, при которомъ онъ употребляется для измѣренія.

ВОЗНИКНОВЕНІЕ И ИСЧЕЗНОВЕНІЕ МАГНИТНЫХЪ ПОЛЕЙ

ЗАКОНЪ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ИНДУКЦИОННЫХЪ ДѢЙСТВІЙ.

303. Если мы соединимъ неподвижно катушку со стальнымъ магнитомъ и будемъ ихъ вмѣстѣ двигать, то электрометръ, соединенный съ концами катушки, не дастъ отклоненія, хотя проволочные витки при этомъ непрерывно перемѣщаются въ магнитномъ полѣ, и, слѣдовательно, электродвижушія силы поля должны оказывать дѣйствіе на электроны проволоки. Уже отсутствіемъ эффекта при спокойномъ положеніи катушки и магнита относительно земной поверхности подтверждается законъ относительности индукціонныхъ дѣйствій, такъ какъ въ этомъ случаѣ катушка и магнитъ оба участвуютъ въ движеніи земли. Только въ томъ случаѣ, когда катушка движется относительно магнита, получаютъ описанныя выше индукціонныя явленія. Если затѣмъ, обратно, перемѣщать магнитъ относительно катушки такимъ образомъ, чтобы возстановить ихъ первоначальное относительное положеніе, то снова наблюдается ударъ напряженія, и притомъ равный и противоположный наблюдавшемуся раньше. Когда же магнитъ и катушка движутся вмѣстѣ такимъ образомъ, что ихъ относительное положеніе остается неизмѣннымъ, то оба дѣйствія взаимно уничтожаются.

Представимъ себѣ, что катушка находится въ абсолютномъ покоѣ въ міровомъ эфирѣ. Если мы къ этой катушкѣ будемъ приближать стальной магнитъ, то электрометръ, соединенный съ концами катушки, обнаруживаетъ напряженіе, которое длится все время, пока движется магнитъ. Чѣмъ объясняется это напряженіе? Магнитное поле само по себѣ не можетъ оказывать силового дѣйствія на электроны катушки, потому что магнитное поле, какъ намъ хорошо извѣстно, дѣйствуетъ лишь на движущіеся электроны, на покоящіеся же дѣйствуетъ лишь электрическое поле. Мы должны, слѣдовательно, заключить, что магнитное поле при своемъ движеніи въ пространствѣ сопровождается электрическими напряженіями

въ эфирѣ. Это обстоятельство въ извѣстной мѣрѣ соотвѣтствуетъ рассмотрѣнному выше (§ 251) факту, что электрическое поле можетъ измѣнить свое положеніе въ пространствѣ лишь въ томъ случаѣ, если къ нему присоединяется магнитное поле.

При движеніи магнитнаго поля въ пространствѣ оно всегда сопровождается электрическими напряженіями; величина этихъ напряженій вдоль произвольной замкнутой кривой равна и противоположна электродвижущей силѣ, съ которой магнитное поле дѣйствовало бы на электроны проволоки, имѣющей форму этой кривой, если бы проволока перемѣщалась съ тою же скоростью, какъ и поле.

Дѣйствія, вызываемыя этими электрическими напряженіями, таковы же, какъ и дѣйствія электродвижущихъ силъ, рассмотрѣнныхъ выше. Если въ движущемся магнитномъ полѣ помѣстить покоящійся кольцеобразный проводникъ, то эти напряженія вызовутъ въ немъ токъ. Если кольцо въ одномъ мѣстѣ перерѣзать, то обѣ поверхности разрѣза заряжаются до напряженія, которое равно и противоположно напряженію вдоль проводящаго кольца, связанному съ магнитнымъ полемъ; поэтому эти напряженія внутри проводника взаимно уничтожаются. Но въ изолирующемъ сѣченіи имѣется электрическое поле того же напряженія, и если мы обѣ поверхности разрѣза соединимъ двумя очень близкими между собой проволоками съ зажимами электрометра, то послѣдній обнаруживаетъ наличность напряженія.

Невозможно отличать силовыя дѣйствія этихъ электрическихъ полей на іоны и электроны проводника отъ электродвижущихъ силъ магнитныхъ полей. Поэтому напряженія, наблюдаемая между концами перерѣзаннаго въ одномъ мѣстѣ проводящаго кольца, называются индуктированными напряженіями, независимо отъ того, вызваны ли они электродвижущими силами магнитнаго поля или же электрическимъ полемъ, которое связано съ перемѣннымъ полемъ. Мы можемъ теперь формулировать *законъ относительности индукціонныхъ дѣйствій*:

Посредствомъ наблюденія индукціонныхъ дѣйствій въ замкнутыхъ проводникахъ въ магнитномъ полѣ ничего нельзя узнать относительно абсолютнаго движенія этихъ проводниковъ; эти дѣйствія зависятъ лишь отъ движенія проводниковъ относительно поля.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКІЯ ПОЛЯ.

304. Хотя непосредственными наблюдениями по большей части невозможно отличить электродвижущія силы магнитнаго поля отъ электрическихъ напряженій, однако безусловно необходимо строго различать ихъ другъ отъ друга. Электродвижущія силы не имѣютъ самостоятельнаго существованія помимо магнитнаго поля: онѣ являются лишь дѣйствіями, по которымъ узнается магнитное поле. Электрическое поле, соединенное съ движущимся магнитнымъ полемъ, наоборотъ, представляетъ собою самостоятельное состояніе ээира; оно существуетъ и тогда, когда мы не наблюдаемъ его посредствомъ проводящаго кольца, введеннаго въ поле; для его возникновенія ээиру должна быть сообщена энергія хотя бы въ очень маломъ количествѣ. Далѣе, послѣ того какъ магнитный стержень приведенъ въ движеніе, необходимъ нѣкоторый промежутокъ (хотя бы и очень малый), чтобы вокругъ стержня образовалось электрическое поле и установилось стаціонарное состояніе. Роль этого электрическаго поля состоитъ въ перенесеніи магнитнаго состоянія въ ээирѣ; дѣйствительно, такъ какъ магнитное поле также требуетъ извѣстнаго количества энергіи, то, по теоремѣ Пойнтинга, для переноса энергіи въ другія части ээира необходима совмѣстная работа электрическаго поля съ магнитнымъ.

Для начинающихъ нѣсколько трудно представить себѣ существованіе этихъ особенныхъ электрическихъ полей при отсутствіи электрическихъ зарядовъ, изъ которыхъ они могли бы исходить. Весьма важно, однако, освоиться со своеобразной природой этихъ полей; безъ этого вся физика ээира остается непонятной.

Представимъ себѣ, что цилиндрической магнитный стержень движется съ постоянной скоростью по направленію своей оси. Представимъ себѣ въ полѣ движущагося стержня проволочное кольцо, плоскость котораго перпендикулярна къ оси стержня, а центръ лежитъ на продолженіи этой оси. Въ этомъ кольцѣ возникаетъ электрической токъ; направленіе его мы можемъ предсказать на основаніи закона относительности, и вмѣстѣ съ тѣмъ мы увидимъ, какъ устроено электрическое поле, соединенное съ движущимся магнитнымъ полемъ. Изъ симметріи слѣдуетъ, что силовыя линіи этого поля представляютъ собою окружности, центры которыхъ лежатъ на оси стержня. Если смотрѣть въ направленіи движенія, то вблизи

положительнаго полюса (N) магнита силовыя лініи ідуць справа налѣво, а вблизи отрицательнаго полюса (S) слѣва направо; въ плоскости симметріи магнита поле равно нулю. Электрическое поле вокругъ движущагося магнитнаго стержня представлено на рис. 215.

Напряженія, возникающія при измѣненіи магнитныхъ полей, могутъ существовать безъ электрическихъ зарядовъ; они въ этомъ случаѣ образуютъ замкнутыя кривыя.

Эти напряженія не удовлетворяютъ условію равновѣсія электрическихъ полей, такъ какъ линейная сумма поля по замкнутой кривой отлична отъ нуля. Какимъ образомъ можно непосредственно измѣрить линейную сумму поля вдоль замкнутой кривой, мы показали въ § 303.

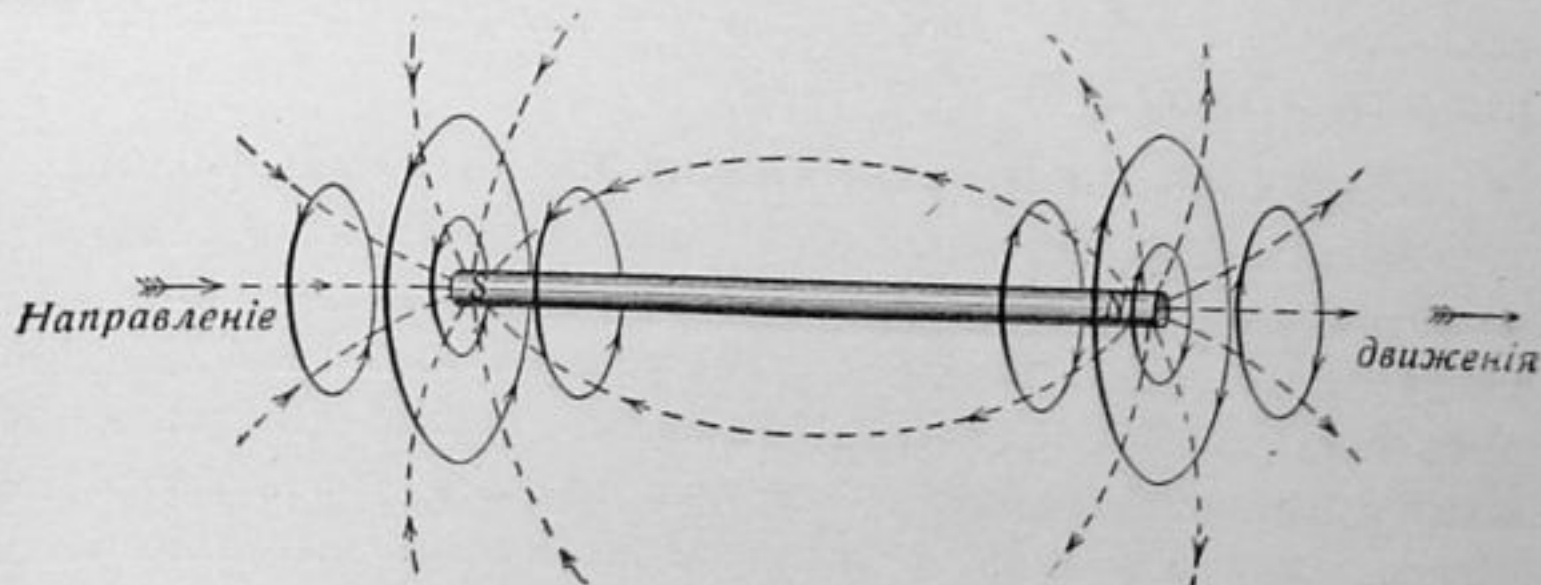


Рис. 215. Электрическое поле вокругъ магнитнаго стержня, движущагося въ направленіи своей длины.

Если въ электрическое поле, связанное съ движущимся магнитнымъ полемъ, ввести проволочное кольцо, перерѣзанное въ одномъ мѣстѣ, и соединить поверхности разрѣза посредствомъ двухъ проволокъ, идущихъ весьма близко одна рядомъ съ другой, со струннымъ электрометромъ или инымъ моментально устанавливающимся вольтметромъ, то этотъ инструментъ покажетъ линейную сумму, которую имѣло бы электрическое поле вдоль кривой, образуемой проволокою, если бы самой проволоки не было.

Дѣйствіе проволочнаго кольца состоитъ въ томъ, что вся искомая линейная сумма поля концентрируется между поверхностями разрѣза кольца. Если вмѣсто кольца взять катушку съ n витками, то между концами обмотки получится въ n -разъ бѣльшая линейная сумма.

Электрическія поля, не удовлетворяющія условію равновѣсія, называются электродинамическими, а поля, напряженія которыхъ находятся въ равновѣсіи, называются электростатическими.

Съ этими двумя названіями не слѣдуетъ связывать какой-либо разницы по существу, такъ какъ дѣйствія, по которымъ обнаруживаются электрическія напряженія, одинаковы для статическихъ и динамическихъ напряженій. Напримѣръ, поле конденсатора на рис. 10 мы можемъ назвать динамическимъ при первыхъ двухъ распредѣленіяхъ и статическимъ — при третьемъ. Въ механикѣ также различаются статическія и динамическія давленія. Статическимъ является, напримѣръ, постоянное давленіе газа, сжатого въ замкнутомъ со всѣхъ сторонъ сосудѣ, динамическимъ — давленіе въ волнѣ сжатія, распространяющейся въ газѣ.

ВОЗНИКНОВЕНІЕ И ИСЧЕЗНОВЕНІЕ МАГНИТНЫХЪ ПОЛЕЙ.

305. Перемѣщеніе магнитнаго поля заключается въ томъ, что магнитное состояніе эѳира исчезаетъ въ одномъ мѣстѣ и появляется въ другомъ. Такимъ образомъ, электрическія напряженія, о которыхъ была рѣчь въ предыдущей главѣ, въ однихъ мѣстахъ возбуждаютъ магнитное поле, а въ другихъ мѣстахъ уничтожаютъ его. Всякое возникающее, какъ и всякое исчезающее магнитное поле связано съ электрическими напряженіями. Если мы наложимъ на полюсь электромагнита (рис. 216) круглую катушку съ n проволочными витками и концы обмотки соединимъ съ зажимами электрометра Ганкеля, то электрометръ покажетъ существованіе напряженія сейчасъ же, какъ только мы замкнемъ намагничивающій токъ. Это напряженіе длится до тѣхъ поръ, пока магнитное поле не достигнетъ стаціонарнаго значенія. Дѣля это напряженіе на n , мы получаемъ линейную сумму электрическаго поля, связаннаго съ возникновеніемъ магнитнаго поля, вдоль окружности, образуемой катушкой. Если разомкнуть намагничивающій токъ, то электрометръ даетъ во время исчезновенія магнитнаго поля отклоненіе въ противоположную сторону.

Для возбужденія магнитнаго поля необходимо возникновеніе электрическихъ напряженій, которыя не уравновѣшиваются взаимно; чтобы магнитное поле вновь исчезло, требуются электрическія напряженія противоположнаго направленія.

Если пользоваться аналогией между магнитным полем и движениями и между электрическим полем и упругими силами (срав. § 252), то это предложение выражает, что магнитные явления в эфире обладают инерцией, которая может быть преодолена лишь электрическими силами напряжений при изменении поля. Это становится вполне ясным, если мы для сравнения будем рассматривать вращение оси, как в § 282; при этом, чтобы сделать действия инерции более наглядными,

мы представим себе, что на ось насажено маховое колесо. Чтобы привести во вращение ось с маховым колесом, нужно приложить силу, вызывающую в оси упругие силы. Эти последние не уравновешиваются другими, пока они еще должны преодолевать сопротивления инерции; это продолжается до тех пор, пока не установится стационарная скорость вращения. Только при постоянной скорости (как в магнитном поле постоянного тока) все действующие силы находятся в статическом равновесии. Чтобы ось и маховое колесо привести обратно в состояние покоя, нужно приложить силы, направленные противоположно тем, которые требовались для возбуждения движения.

Если электрические напряжения не находятся в равновесии, то они всегда должны либо возбуждать магнитное поле, либо же, если таковое уже имеется, изменять его. Электрическое поле, которое, подобно представленному на рис. 10, не находится в равновесии, возбуждает, следовательно, магнитное поле, вызывающее, как мы видели в § 250, перемещение электрических силовых линий. Из-

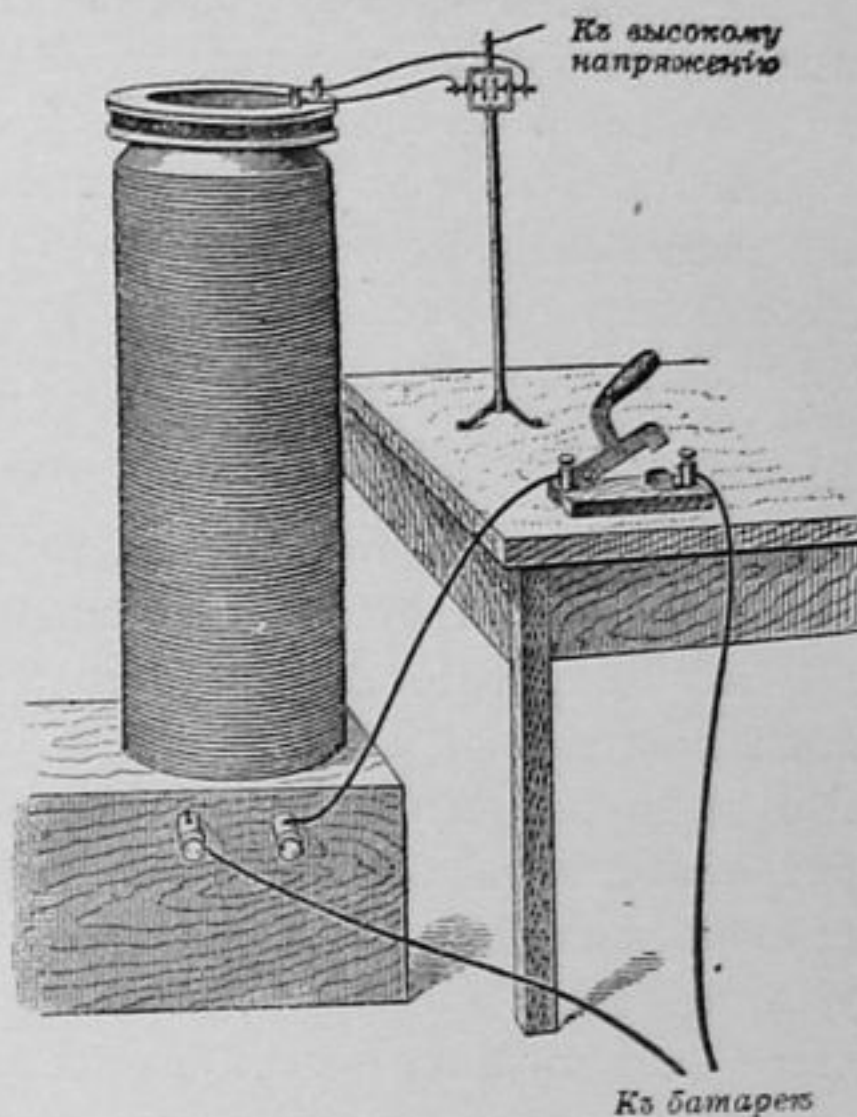


Рис. 216. Измерение электрических напряжений в возникающем и исчезающем магнитном поле при помощи проволочной катушки и электрометра.

мѣненіе электрическаго поля идетъ въ такомъ направленіи, что поле приближается къ состоянію равновѣсія. Но поле не можетъ оставаться въ состояніи равновѣсія, если магнитный процессъ не закончился. Благодаря этому сперва возникаютъ электромагнитныя колебанія, которыя затухаютъ вслѣдствіе поглощенія энергіи въ проводникахъ и, наконецъ, приводятъ къ электрическому равновѣсію. Этотъ процессъ аналогиченъ механическому процессу, наблюдаемому нами при внезапномъ отпусканіи согнутой пружины. Такъ какъ сейчасъ послѣ того, какъ мы отпустимъ пружину, упругія силы не находятся въ равновѣсіи, то возникаетъ движеніе, направленное къ положенію равновѣсія; но пружина не можетъ остаться въ равновѣсіи, такъ какъ движеніе еще не прекращается. Такимъ образомъ возникаютъ колебанія, при которыхъ вслѣдствіе тренія теряется энергія до тѣхъ поръ, пока, наконецъ, не установится равновѣсіе.

ВТОРОЙ ОСНОВНОЙ ЗАКОНЪ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ МАКСВЕЛЛА.

306. Изъ закона относительности непосредственно видно, насколько велики электрическія напряженія, которыми сопровождаются измѣненія магнитнаго поля. Для того, чтобы внезапно вызвать магнитное поле въ опытѣ, описанномъ въ § 305, можно было бы, вмѣсто того, чтобы замыкать намагничивающій токъ, быстро передвинуть подъ неподвижную катушку постоянный магнитъ, находившійся на большомъ разстояніи отъ катушки. Изъ закона относительности слѣдуетъ, что ударъ напряженія, наблюдаемый при внезапномъ возникновеніи поля столь же великъ, какъ и ударъ, вызываемый электродвижущими силами магнитнаго поля, если катушку, весьма удаленную отъ постоянного магнита, приблизить и положить на магнитъ. Ударъ напряженія, сопровождающій исчезновеніе магнитнаго поля, таковъ же, какъ и толчекъ, получаемый при удаленіи катушки изъ постояннаго магнитнаго поля, т.-е. онъ равенъ первому толчку по величинѣ, но противоположенъ по направленію. Эти теоретическія слѣдствія изъ закона относительности могутъ быть легко проверены экспериментально.

Если мы будемъ переводить катушку изъ весьма удаленной области, гдѣ сила магнитнаго поля равна нулю или безконечно мала, въ область, гдѣ сила поля больше, то каждая силовая линія, входящая въ ограничиваемое катушкой пространство, должна однажды пересѣчь кольцо катушки. Поэтому витки катушки пересѣкаютъ то.

самое число силовыхъ линий, которое проходитъ по окончаніи опыта черезъ ограничиваемый катушкой кругъ. Отсюда получается слѣдующій законъ:

Полный электрическій ударъ напряженія вдоль замкнутой кривой, сопровождающій возникновеніе магнитнаго поля, равенъ магнитному силовому потоку, пронизывающему послѣ окончательнаго образованія поля поверхность, ограничиваемую этою кривою.

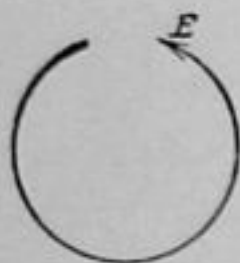
Электрическій ударъ напряженія при исчезновеніи магнитнаго поля равенъ по величинѣ удару при возникновеніи того же поля и противоположенъ ему по направленію.

307. Этотъ законъ даетъ намъ возможность найти механическую аналогію той величины, которая называется „магнитнымъ силовымъ потокомъ“. Если въ модели ээира, описанной въ § 252, существуетъ напряженіе упругихъ частицъ вдоль замкнутой кривой, то внутри этой кривой должно происходить вращеніе шариковъ, такъ какъ кривую, составленную изъ упругихъ частичекъ, можно разсматривать, какъ охватывающій шарики канатъ, къ которому приложены силы, стремящіяся повернуть его въ одну сторону. Если силы, тянущія этотъ „канатъ“ въ его собственномъ направленіи, взаимно уничтожаются, какъ въ электростатикѣ, то имѣетъ мѣсто равновѣсіе. Изъ механики извѣстно, что ударъ, дѣйствующій на тѣло, равенъ возникающему при этомъ количеству движенія, т.-е. произведенію изъ массы на скорость. Этотъ законъ имѣетъ силу не только для брошеннаго по прямой линіи тѣла, для котораго количество движенія равняется $m \cdot v$, гдѣ m —масса, v —скорость, но также и для вращательныхъ движеній, напримѣръ, маховаго колеса. Если K —моментъ инерціи вращающагося тѣла, $\omega = 2\pi \cdot N$ —его угловая скорость (N —число оборотовъ въ секунду), то количество движенія при вращеніи равно $K \cdot \omega$. Оно равняется суммѣ по времени силъ вращенія, т.-е. моментовъ вращенія, приведшихъ тѣло во вращеніе. Въ механической модели ээира эта сумма напряженій по времени вдоль замкнутой кривой равняется количеству движенія вызываемыхъ ею ээирныхъ вращеній.

Если въ механической модели ээира аналогіей силы магнитнаго поля служитъ угловая скорость, то аналогіей магнитнаго силового потока будетъ связанное съ вращеніями количество движенія частицъ.

308. Такъ какъ въ переменномъ магнитномъ полѣ вся сумма по времени напряженія вдоль замкнутой кривой отъ возникновенія поля до любого момента равняется числу магнитныхъ линий индукціи, охватываемыхъ кривою, то произведение изъ напряженія V , наблюдаемаго на струнномъ электрометрѣ въ малый промежутокъ времени τ , на величину τ , т.-е. $V \cdot \tau$, должно равняться происшедшему за время τ измѣненію числа охватываемыхъ линий индукціи. Если мы назовемъ это измѣненіе черезъ ν , то $V \cdot \tau = \nu$, или $V = \frac{\nu}{\tau}$. Частное $\frac{\nu}{\tau}$ представляетъ собою скорость измѣненія силового потока, или его измѣненіе, рассчитанное на секунду.

Второй основной законъ электродинамики Максвелла. Если въ эфирѣ имѣются электрическія напряженія, не находящіяся въ равновѣсіи, то происходитъ измѣненіе магнитнаго состоянія; при этомъ приращеніе за одну секунду силового потока, пронизывающаго нѣкоторую площадь, равняется



Измѣненіе силового потока представлено слагающей, вступающей въ плоскость рисунка.



Измѣненіе силового потока представлено слагающей, выходящей изъ плоскости рисунка.

Рис. 217. Направленіе электрическихъ напряженій, вызывающихъ измѣненіе магнитнаго силового потока.

линейной суммѣ электрическаго поля вдоль кривой, ограничивающей эту площадь.

Силовой потокъ возрастаетъ въ томъ направленіи, по которому нужно смотрѣть, чтобы получить положительную линейную сумму (рис. 217), идя вдоль кривой справа налѣво, т.-е. въ направленіи, обратномъ движенію часовой стрѣлки. Если поверхность окружить замкнутой проволочной катушкой, то напряженіе вызоветъ въ ней электрическій токъ, магнитное поле котораго стремится уменьшить измѣненія силового потока.

Второй основной законъ Максвелла вполне аналогиченъ уравненію механики „сила равняется массѣ, умноженной на ускореніе“, которое можно выразить еще такъ: „сила равняется приращенію количества движенія во времени“. Электрическому напряженію вдоль замкнутой кривой въ механической модели эфира соответствуетъ сила упру-

гихъ напряженій, не уравновѣшиваемыхъ другими силами, а возрастанію силового потока во времени соотвѣтствуетъ приращеніе количества движенія вращающихся эѳирныхъ шариковъ.

ЗАКОНЪ ИНДУКЦИИ.

309. Какъ было уже указано въ § 303, полное напряжение между концами катушки при ея движеніи въ магнитномъ полѣ или же при измѣненіи магнитнаго поля называется индуктированнымъ въ катушкѣ напряженіемъ. Законъ Максвелла вмѣстѣ съ закономъ относительности приводитъ къ слѣдующему общему закону:

Индуктированное въ катушкѣ напряжение равняется произведенію изъ разсчитаннаго на секунду измѣненія магнитнаго силового потока, проходящаго черезъ плоскость ея витковъ, на число витковъ.

Часто оказывается болѣе удобнымъ формулировать этотъ законъ при помощи примѣненнаго въ § 297 представленія о пересѣченіи силовыхъ линій. Чтобы обнять также и общій случай измѣненія магнитнаго поля, напримѣръ, въ опытѣ, изображенномъ на рис. 216, нужно вообразить, что силовыя линіи магнитнаго поля при его возникновеніи приходятъ изъ безконечности и при его исчезновеніи удаляются въ безконечность. Чтобы проникнуть въ окруженное катушкой пространство или чтобы выйти изъ него, силовыя линіи должны пересѣчь витки катушки. Полное напряжение между концами катушки получается по слѣдующему правилу:

Напряжение, индуктированное въ какой-либо части проводника, по абсолютной величинѣ равняется числу магнитныхъ индукціонныхъ линій, пересѣкаемыхъ ею въ одну секунду.

Напряжение между концами катушки получается посредствомъ суммированія напряженій, индуктированныхъ вдоль всего проводника.

При этомъ слѣдуетъ, конечно, имѣть въ виду, что, смотря по направленію магнитныхъ силовыхъ линій, и въ зависимости отъ того, выходятъ ли силовыя линіи или входятъ, напряжение должно считаться то положительнымъ, то отрицательнымъ. Направленіе индуктированного напряжения проще всего опредѣляется по слѣдующему правилу: магнитное поле индукціоннаго тока, получаемаго при соединеніи концовъ катушки проводникомъ, стремится препятствовать измѣненію поля, пронизывающаго плоскость витковъ.

САМОИНДУКЦІЯ.

310. Въ опытѣ, описанномъ въ § 305, можно замѣтить, что при замыканіи намагничивающаго тока напряженіе возрастаетъ не очень сильно, но держится довольно долго; наоборотъ, при размыканіи тока напряженіе повышается очень сильно, но длится весьма короткое время. Произведеніе изъ напряженія на время, т.-е. ударъ напряженія, конечно, одинаковъ въ обоихъ случаяхъ.

Чтобы объяснить это различіе явленій при замыканіи и размыканіи намагничивающаго тока, мы воспользуемся сравненіемъ съ осью, снабженной маховымъ колесомъ. Предположимъ, что мы вращаемъ колесо съ помощью постоянной не очень большой силы и желаемъ сообщить ему опредѣленную скорость; для этого требуется нѣкоторое время, въ теченіе котораго скорость вращенія постепенно нарастаетъ до желаемой величины. При этомъ въ оси не возникаетъ напряженій, превосходящихъ тѣ, которыя соотвѣтствуютъ приложенной силѣ. Съ другой стороны, при помощи тормоза мы можемъ, напротивъ, чрезвычайно скоро остановить вращающееся колесо, при чемъ возникаютъ очень большія силы реакціи.

Ясно, что и въ случаѣ магнитнаго поля причиной медленнаго возрастанія, наблюдаемаго въ опытѣ, является его инерція. Постоянное напряженіе V батареи, соединенной съ зажимами катушки, должно уравнивать двѣ противодѣйствующія силы: во-первыхъ, омическое напряженіе, имѣющее, при силѣ тока J и при сопротивленіи намагничиваемой катушки R , величину $R \cdot J$ и, во-вторыхъ, линейную сумму V' электрическаго поля, возбуждаемаго магнитнымъ полемъ, вдоль витковъ катушки. Слѣдовательно, $V = V' + R \cdot J$. Чѣмъ больше V' , тѣмъ быстрее, согласно закону Максвелла, возрастаетъ магнитное поле. Сначала, когда $J = 0$, $V' = V$, т.-е. все приложенное напряженіе можетъ идти на преодоленіе инерціи магнитнаго поля; поле и вмѣстѣ съ нимъ токъ J возрастаютъ съ наибольшей скоростью. Но когда токъ J достигаетъ замѣтной величины, то напряженіе $V' = V - R \cdot J$ убываетъ, и потому дальнѣйшее возрастаніе магнитнаго поля (и тока) идетъ все медленнѣе и медленнѣе, и, наконецъ, когда будемъ имѣть $R \cdot J = V$, $V' = 0$, поле сдѣлается стационарнымъ. Промежутокъ времени, потребный для достиженія стационарнаго состоянія, зависитъ отъ инерціи магнитнаго поля и сопротивленія катушки. Его можно было бы сократить, заставляя при

образовані поля на нѣкоторое время дѣйствовать напряженіе, бѣльшее, чѣмъ V . Зато магнитное поле катушки можно уничтожить съ произвольной быстротой посредствомъ размыканія тока. При этомъ въ эфирѣ возникаютъ весьма высокія напряженія, и витки катушки должны быть хорошо изолированы, чтобы между ними при этомъ не происходило разрядовъ. Сильныя напряженія, значительно превосходящія напряженіе V , при помощи котораго вызывается магнитное поле, возникаютъ въ особенности между концами проводовъ въ мѣстѣ ихъ размыканія. Вслѣдствіе этого между ними происходитъ дуговой разрядъ, такъ называемая искра размыканія, быстро истощающая энергію магнитнаго поля. Аналогія съ маховымъ колесомъ вполне ясна. Инерціи магнитнаго поля соотвѣтствуетъ моментъ инерціи махового колеса, омическому сопротивленію соотвѣтствуютъ различныя сопротивленія тренія, напряженію V — сила, приводящая колесо во вращеніе, и, наконецъ, искрѣ размыканія соотвѣтствуетъ тормазъ, въ которомъ поглощается кинетическая энергія махового колеса.

Напряженія между концами намагничивающейся катушки, уравновѣшивающія инерцію магнитнаго поля, называются напряжениями самоиндукціи, такъ какъ они индуктируются въ катушкѣ ея собственнымъ магнитнымъ полемъ. Явленія, зависящія отъ напряженій самоиндукціи, называются явлениями самоиндукціи, а свойство катушки обнаруживать ихъ называется самоиндукціей. Терминъ „самоиндукція“ можно было бы вполне замѣнить болѣе нагляднымъ выраженіемъ „инерція магнитнаго поля катушки“.

Нижеслѣдующимъ опытомъ можно показать, какія большія напряженія получаютъ при быстромъ исчезновеніи сильнаго магнитнаго поля. Приключимъ къ двумъ зажимамъ большого электромагнита лампу накаливанія, горящую нормально при напряженіи V , взятомъ для намагничивающаго тока. Въ моментъ замыканія тока лампа горитъ съ нормальной яркостью. Если не введено никакого предварительнаго сопротивленія, то яркость остается постоянной; если же введено предварительное сопротивленіе, то яркость нѣсколько падаетъ съ развитіемъ магнитнаго поля и намагничивающаго тока, вслѣдствіе потери напряженія. Если затѣмъ, когда магнитное поле станетъ стационарнымъ, быстро разомкнуть токъ, то лампа, прежде чѣмъ потухнуть, вспыхиваетъ на подобіе молніи съ чрезвычайной яркостью, во много разъ превышающей нормальную; если размыканіе производится очень быстро, то нить перегораетъ (рис. 218).

Какъ мы видѣли, энергія магнитнаго поля поглощается искрой размыканія, и послѣдняя поэтому тѣмъ сильнѣе, чѣмъ больше энергія магнитнаго поля. Эта энергія зависитъ, однако, не только отъ силы тока, но также и отъ другихъ особенностей поля, главнымъ образомъ, отъ присутствія желѣза. Приключимъ къ одному полюсу маленькой батареи аккумуляторовъ мѣдный штифтъ, а къ другому — обыкновенный напилкъ; кромѣ того, гдѣ-либо въ цѣпь введемъ катушку съ не слишкомъ малымъ числомъ витковъ. Если провести штифтомъ вдоль по напилку, то токъ будетъ то замы-

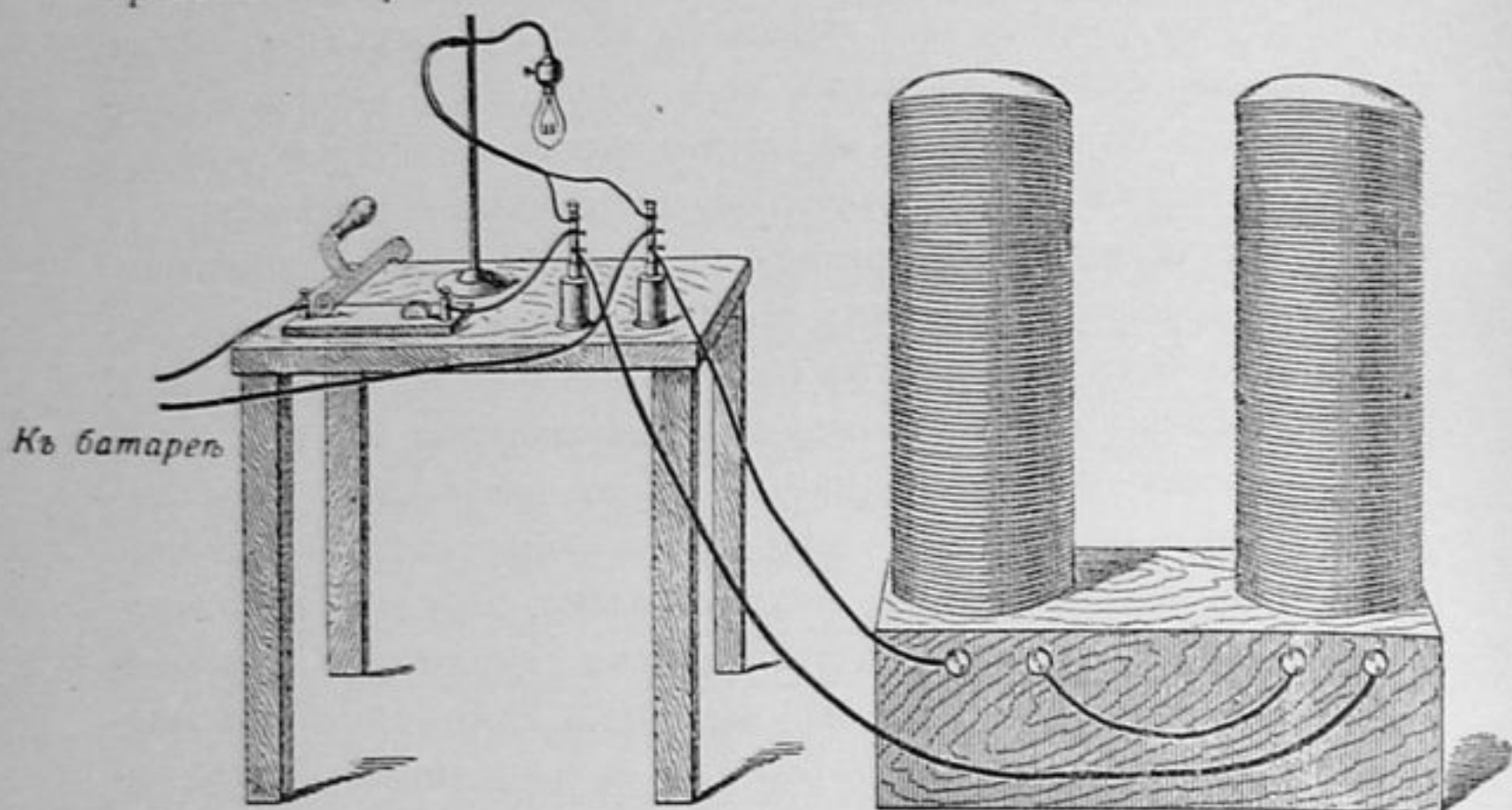


Рис. 218. Демонстрація напруженої самоиндукції въ большому электромагнитѣ.

каться, то размыкаться; при этомъ будутъ замѣтны небольшія искорки, появляющіяся при размыканіи тока. Если теперь, оставляя все прочее безъ измѣненія, введемъ въ катушку желѣзный сердечникъ, то искорки тотчасъ же станутъ значительно болѣе сильными, такъ какъ при той же силѣ тока присутствіе желѣза значительно увеличиваетъ энергію поля.

311. Юиттъ (Hewitt) предложилъ примѣнять высокія напруженія самоиндукції, возникающія при размыканіи тока, для зажиганія ртутной дуговой лампы. Мы видѣли въ § 184, что свѣтовую дугу можно зажигать двумя способами: чтобы довести электроды до требуемой высокой температуры, либо сближаютъ ихъ до соприкосновенія и затѣмъ разъединяютъ, либо же на короткое время до-

водятъ напряженіе до максимальной величины напряженія при разрядѣ и тѣмъ возбуждаютъ искры, быстро переходящія въ свѣтовую дугу. Юиттъ пользуется въ своихъ ртутныхъ дуговыхъ лампахъ вторымъ приѣмомъ, такъ какъ при первомъ способѣ приходится передвигать всю лампу. Въ качествѣ самоиндукціи передъ ртутной дуговой лампой включается катушка съ желѣзнымъ сердечникомъ (рис. 219), лампа же сперва коротко замыкается мѣдной дугой. Если

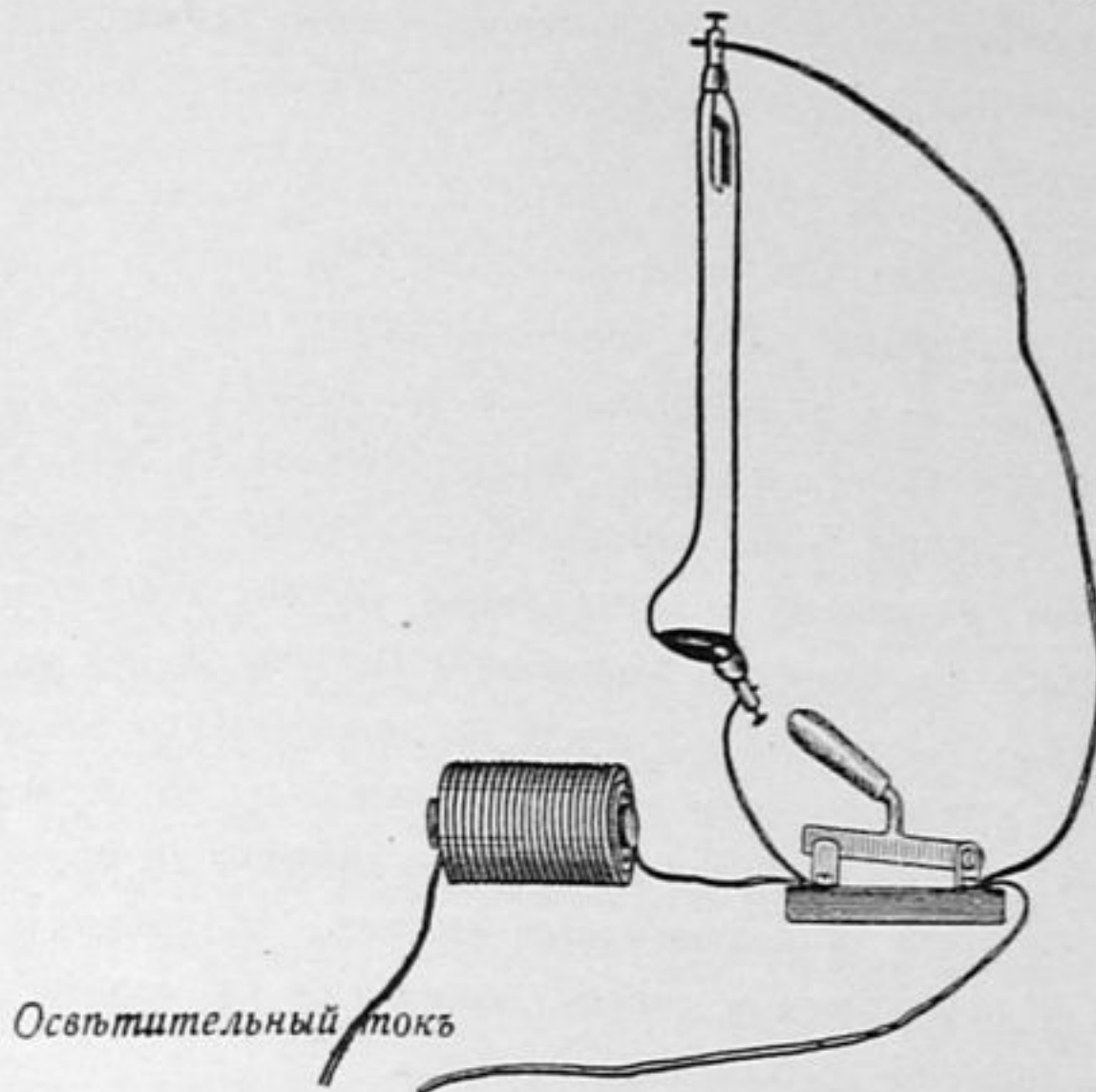


Рис. 219. Зажиганіе ртутной дуговой лампы посредствомъ напряженія самоиндукціи.

затѣмъ приложить напряженіе, то токъ проходитъ черезъ самоиндукцію и черезъ короткій замыкатель. Затѣмъ послѣдній вынимается, и тогда, вслѣдствіе сильнаго магнитнаго поля, въ катушкѣ въ точкахъ разрыва, т.-е. у зажимовъ ртутной лампы, возникаетъ столь сильное напряженіе, что происходитъ разрядъ, который быстро развивается въ свѣтовую дугу и въ этой формѣ сохраняется и при постоянномъ болѣе низкомъ напряженіи освѣтительнаго провода.

МАГНИТНЫЯ СВОЙСТВА ТЪЛЪ

ПУСТОТА.

312. Мы можемъ сравнить два опредѣленія магнитнаго поля съ двумя опредѣленіями электрическаго поля. Оба состоянія эѳира, во-первыхъ, опредѣляются чисто количественнымъ образомъ: электрическое возбужденіе — количествомъ электрическихъ зарядовъ (§ 51), сила магнитнаго поля — числомъ амперъ-витковъ (§ 244). Во-вторыхъ, оба состоянія эѳира опредѣляются путемъ измѣренія силъ: электрическое напряженіе — опредѣляется силой, дѣйствующей на покоящуюся электрически заряженную частичку (§ 19), магнитный силовой потокъ — силой, дѣйствующей на движущіеся электроны и іоны (§ 296). Механическими аналогіями являются: въ первомъ случаѣ — геометрически измѣряемая величины деформации модели эѳира и угловой скорости ея вращающихся частицъ, во второмъ случаѣ — величины, опредѣляемая силами: напряженіе въ модели эѳира и количество движенія вращающихся частицъ.

Какъ обѣ величины, характеризующія электрическое поле, такъ и обѣ величины, характеризующія магнитное поле, опредѣляются совершенно независимо одна отъ другой, и а priori нельзя ничего сказать обѣ ихъ взаимномъ отношеніи. Ясно, во всякомъ случаѣ, только то, что, разъ обѣ величины измѣряютъ одно и то же состояніе эѳира, онѣ должны быть связаны однозначной зависимостью. Практическія измѣренія показали, что для пустоты эта зависимость простѣйшая, т.-е. имѣетъ форму пропорціональности.

Сила магнитнаго поля и магнитный силовой потокъ въ пустотѣ направлены всегда одинаково и пропорціональны между собою:

$$B = M \cdot H.$$

Величина M , т.-е. коэффициентъ пропорціональности между силовымъ потокомъ и силой поля, носитъ названіе проницаемости

мірового ээира. Механическою аналогією проницаемости является удѣльная инерція, т. е. плотность.

Соотвѣтственный законъ электростатики мы изложили въ § 62 подъ именемъ закона Кулона. Такимъ образомъ, какъ діэлектрическая постоянная, такъ и проницаемость мірового ээира не измѣняются въ зависимости отъ силы электрическаго или магнитнаго поля. Опыты показываютъ, что это обобщеніе можетъ быть проведено и дальше. Діэлектрическая постоянная ээира не мѣняется отъ присутствія магнитнаго поля, а проницаемость — отъ присутствія электрическаго поля. Оба свойства ээира являются абсолютными универсальными постоянными. Мы приходимъ такимъ образомъ къ *всеобщему принципу наложенія (суперпозиціи)*:

Физическія свойства мірового ээира нисколько не мѣняются въ зависимости отъ его электрическаго или магнитнаго состоянія. Если къ имѣющимся уже полямъ присоединяются новыя поля, то они налагаются другъ на друга такъ, какъ если бы ээиръ былъ лишенъ поля.

Этимъ весьма замѣчательнымъ закономъ ээиръ рѣзко отличается отъ всякой вѣсомой матеріи. Физическія свойства вѣсимаго вещества измѣняются всѣ вмѣстѣ, какъ только физическое состояніе вещества измѣняется въ какомъ-нибудь одномъ отношеніи (напримѣръ, когда измѣняется температура или давленіе и т. д.), и по измѣненіямъ свойствъ можно наблюдать измѣненія состоянія вещества. Состоянія же ээира въ силу принципа наложенія не могутъ быть познаваемы по его собственнымъ свойствамъ, и мы должны поэтому изучать ихъ по дѣйствіямъ полей на вѣсомыя тѣла (электроскопы и магнитоскопы).

ПРОНИЦАЕМОСТЬ ЭЭИРА.

313. Для отличія отъ проницаемостей вѣсомыхъ веществъ мы въ дальнѣйшемъ изложеніи будемъ обозначать проницаемость пустоты черезъ M_0 . Какъ найти M_0 , ясно изъ самаго опредѣленія этой величины. Одно и то же поле измѣряется по методу, описанному въ § 245, въ амперъ-виткахъ на сантиметръ, а затѣмъ способомъ, описаннымъ въ § 299 и сл., въ вольтъ-секундахъ на квадратный сантиметръ. Такъ, напримѣръ, для земнаго поля мы нашли въ § 246 $H = 0,385 \frac{\text{амп.} \cdot \text{вит.}}{\text{см.}}$, а въ § 300 $B = 0,48 \cdot 10^{-8} \frac{\text{вольтъ} \cdot \text{сек.}}{\text{кв. см.}}$. Отсюда получается: $M_0 = B : H = 1,25 \cdot 10^{-8}$. Производятся ли измѣре-

нія въ пустотѣ или въ воздухѣ, результатъ получается одинъ и тотъ же.

Чрезвычайно точныя измѣренія абсолютной проницаемости чистаго мірового ээира дали:

$$M_0 = 1,256 \cdot 10^{-8} \frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{амп.-см.}}$$

ТАКЪ НАЗЫВАЕМЫЯ АБСОЛЮТНЫЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЯ ЕДИНИЦЫ.

314. Въ литературѣ мы часто встрѣчаемъ единицы, получающіяся отъ умноженія легальныхъ единицъ на нѣкоторую степень числа 10, т.-е. принадлежащія къ той же десятичной системѣ. По причинѣ, съ которой мы сейчасъ познакомимся, эти единицы называются абсолютными электромагнитными и обозначаются символомъ *em*. За *em* единицу напряженія принимаютъ сантимикровольтъ: $1 \text{ em} = 10^{-8}$ вольтъ; *em* единицей заряда считается декакулонъ: $1 \text{ em} = 10$ кулонамъ. Единица силы магнитнаго поля по этой системѣ, именно $10 \frac{\text{амп.-витк.}}{\text{см.}}$, никогда не употребляется; величину поля всегда выражаютъ лишь силовымъ потокомъ, при чемъ единицей служить $10^{-8} \frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{кв. см.}}$. Эта единица настолько распространена, что въ большинствѣ случаевъ, если не дѣлаютъ оговорки, предполагается именно эта единица. Такъ, напримѣръ, принято говорить, что горизонтальная слагающая земнаго поля равняется 0,18, вмѣсто $0,18 \cdot 10^{-8} \frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{кв. см.}}$, или что въ сильномъ полѣ электромагнита число силовыхъ линий равняется 10000 на кв. см., вмѣсто $10^{-4} \frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{кв. см.}}$. Въ виду того, что магнитное поле измѣряется только этой единицей, она то называется силой магнитнаго поля и обозначается буквой *H*, то называется магнитной индукціей и обозначается черезъ *B*. Такое смѣшеніе двухъ совершенно различныхъ понятій недопустимо, хотя оно исторически, можетъ быть, и оправдывается. Поэтому мы будемъ строго различать силу поля $H \frac{\text{декаамп.-в.}}{\text{см.}}$ отъ индукціи $B \frac{\text{сантимикровольтъ-сек.}}{\text{кв. см.}}$. Въ *em* единицахъ абсолютная проницаемость ээира въ 10^9 разъ больше, нежели въ легальныхъ единицахъ, т.-е. $M_0 = 12,56$. Это число, въ предѣлахъ погрѣшностей наблюденій, равно 4π . Единицей энергіи въ *em*-си-

стемѣ служить произведеніе изъ 10 кулоновъ на 10^{-8} вольтъ, т.-е. 10^{-7} джулей = 1 эргъ.

Такъ называемая абсолютная электромагнитная система мѣръ характеризуется тѣмъ, что единицей энергіи въ ней служить 1 эргъ, а абсолютная проницаемость ээира равняется $4\pi = 12,56$.

315. Чтобы понять эту странную систему мѣръ, необходимо обратиться къ историческому развитію измѣрительной техники. Первый опытъ установленія системы мѣръ былъ сдѣланъ Гауссомъ и Веберомъ въ ту эпоху, когда современные весьма удобные и тонкіе измѣрительные методы еще не были извѣстны. Поэтому Гауссъ и Веберъ въ своемъ стремленіи установить постоянныя единицы должны были идти совершенно инымъ путемъ, чѣмъ мы теперь. Они исходили изъ измѣренія силъ, такъ какъ въ ихъ время, когда между всѣми отдѣлами измѣрительной физики наиболѣе развита была измѣрительная механика, измѣреніе силъ относительно отличалось точностью. Два совершенно тождественные магнитные полюса, дѣйствующіе другъ на друга на разстояніи 1 см. съ силою въ 1 дину, они приняли за полюсы-единицы, а единицей поля они считали поле на разстояніи 1 см. отъ полюса-единицы ($B = 1$). Единица электрическаго тока опредѣлялась помощью длиннаго соленоида съ поверхностью витковъ въ 1 кв. см. Когда черезъ этотъ соленоидъ проходилъ токъ, поле котораго на нѣкоторомъ разстояніи было повсюду тождественно съ полемъ магнитнаго стержня, имѣвшаго ту же длину и силу полюсовъ 1, то число витковъ съ токомъ должно было точно выражаться значеніе 1 em на сантиметръ. Такимъ путемъ, дѣйствительно, были получены единицы, которыя можно было воспроизводить съ нѣкоторою точностью, именно em -единицы. Слѣдуетъ упомянуть, что была сдѣлана попытка построить вторую систему единицъ, подобную em -системѣ, именно, описанную въ § 78 es -систему. Въ послѣдней вмѣсто двухъ полюсовъ-единицъ въ основу положены два электрическіе заряда-единицы, дѣйствующіе другъ на друга на разстояніи 1 см. съ силою, равною 1 динѣ. Но такъ какъ мѣры em -системы все-таки легче реализовать, нежели мѣры es -системы, то она и предпочиталась послѣдней до тѣхъ поръ, пока обѣ онѣ не уступили мѣста единицамъ „практической“ системы мѣръ, опредѣленнымъ посредствомъ современныхъ измѣрительныхъ методовъ.

Современная система мѣръ не есть ни электрическая, ни „электромагнитная“, такъ какъ она не основана на измѣреніи механическихъ силъ.

Замѣчательно, однако, что нерѣдко все-таки высказывается неправильный взглядъ, будто наша система мѣръ есть „электромагнитная“. По понятнымъ соображеніямъ (чтобы облегчить переходъ отъ одной системы къ другой), единицы вольтъ и кулонъ опредѣлены были такъ, чтобы онѣ различались отъ единицъ старой системы Гаусса лишь множителями, представляющими степени 10. Но фактически нельзя отрицать, что опредѣленіе самыхъ единицъ помощью нормального элемента и серебрянаго кулонметра совершенно иное.

Большимъ недостаткомъ старыхъ системъ единицъ является то, что ихъ опредѣленія страдаютъ вреднымъ смѣшеніемъ двухъ совершенно различныхъ научныхъ задачъ.

Для развитія количественной, измѣрительной науки прежде всего необходимо опредѣлять единицы такъ, чтобы ихъ можно было воспроизводить легко и съ точностью.

Эта задача весьма несовершенно разрѣшалась сложными и очень трудными операціями такъ называемой электромагнитной системы мѣръ. Наоборотъ, при помощи нормального элемента, серебрянаго кулонметра и нормального ома она разрѣшается наилучшимъ образомъ.

Вторая задача, которая не имѣетъ съ первой ничего общаго и при всей своей важности далеко не имѣетъ такого фундаментальнаго значенія, какъ первая, заключается въ возможно болѣе точномъ нахожденіи обѣихъ универсальныхъ постоянныхъ K_0 и M_0 , діэлектрической постоянной и проницаемости мірового эфира, въ установленныхъ единицахъ.

Эта вторая задача связываетъ электромагнитную систему мѣръ съ первой задачей, такъ какъ эта система полагаетъ $M_0 = 4\pi$. Но несомнѣнно, что научный путь существуетъ только одинъ: къ рѣшенію второй задачи слѣдуетъ приступить лишь по разрѣшеніи первой. Она имѣетъ для физики такое же значеніе, какъ опредѣленіе механическаго эквивалента теплоты, ускоренія силы тяжести, скорости свѣта, газовой константы.

Поэтому, нисколько не умаляя заслугъ Гаусса и Вебера, создавшихъ первую удовлетворительную систему мѣръ, нужно, однако, признать, что было бы желательно совершенно изъ-

ять, наконецъ, изъ употребленія старья, т. и. абсолютныя, единицы. И прежде всего слѣдуетъ разстаться съ ошибочнымъ мнѣніемъ, будто желательно слить обѣ указанныя задачи и при всякомъ усовершенствованіи въ измѣреніи M_0 пересматривать установленныя единицы и исправлять ихъ, дабы онѣ съ достигнутой точностью соответствовали равенству $M_0 = 4\pi \cdot 10^9$. Наоборотъ, для прогресса науки необходимо, чтобы единицы были по возможности прочно установлены и никогда болѣе не мѣнялись. Подобнымъ образомъ единица длины — метръ — теперь опредѣляется, какъ длина платиновой линейки, находящейся въ Парижѣ, и уже никто не собирается послѣ новаго измѣренія земли мѣнять единицу длины такъ, чтобы она снова равнялась $\frac{1}{40000000}$ части меридіана, съ которой она не совпадаетъ, какъ уже давно извѣстно.

КОЭФФИЦИЕНТЪ САМОИНДУКЦИИ.

316. Если катушку или другой проводникъ тока внезапно соединить съ источникомъ электричества, то напряженіе между обоими подводщими токъ зажимами проводника слагается изъ двухъ величинъ — напряженія, уравнивающего, по закону Ома, сопротивление проводника (RJ), и напряженія самоиндукціи, необходимаго для преодоленія инерціи магнитнаго поля. По второму основному закону Максвелла (§ 308), самоиндукція пропорціональна приращенію магнитнаго силового потока за секунду и, согласно принципу наложенія, пропорціональна также приращенію силы тока въ секунду.

Опредѣленіе коэффициента самоиндукціи: Коэффициентъ пропорциональности, на который слѣдуетъ помножить приращеніе силы тока за секунду, чтобы получить напряженіе самоиндукціи между подводщими токъ зажимами проводника, называется коэффициентомъ самоиндукціи этого проводника.

Единица коэффициента самоиндукціи въ легальной системѣ мѣръ называется 1 генри:

$$1 \text{ генри} = 1 \frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{амперъ}}$$

Коэффициенты самоиндукціи обозначаются обычно буквою L . Законъ наложенія мы можемъ теперь формулировать еще такъ:

Коэффициентъ самоиндукціи опредѣленной цѣпи въ пустотѣ есть величина постоянная для всякой силы тока.

Чтобы составить приблизительное представление о величинѣ одного генри, вообразимъ катушку, которая можетъ имѣть нѣсколько слоевъ обмотки, но такихъ, что толщина обмотки мала въ сравненіи съ діаметромъ катушки. Предположимъ, что средняя поверхность витка равняется q и на каждый сантиметръ приходятся n витковъ. Положимъ, что длина катушки l весьма велика въ сравненіи съ ея толщиной и что общее число витковъ $N = l \cdot n$ весьма велико. Какъ мы знаемъ, поле внутри весьма длинной катушки почти однородно и при силѣ тока J сила поля равняется $H = n \cdot J \frac{\text{амп.-витк.}}{\text{см.}}$. Далѣе, индукція равняется $B = M n J$, и полное число силовыхъ линий, окруженныхъ катушкой, равняется $M \cdot n \cdot J \cdot q$ вольтъ-сек. Сумма по времени всего напряженія вдоль N витковъ катушки, измѣряющая ударъ напряженія между подводными зажимами, составляетъ до момента, когда токъ возрастаетъ до своей конечной силы J , $M \cdot n \cdot J \cdot q \cdot N$ вольтъ-сек. Слѣдовательно, коэффициентъ самоиндукціи равняется

$$L = M \cdot N \cdot n \cdot q = M \cdot n^2 \cdot l \cdot q \text{ генри.}$$

Если мы здѣсь, вмѣсто M , подставимъ величину $1,256 \cdot 10^{-8}$, то посредствомъ простого вычисленія найдемъ, что катушка обладаетъ коэффициентомъ самоиндукціи въ 1 генри, если ея витки имѣютъ средній діаметръ въ 10 см. ($q = 78,54$ кв. см.), на 1 см. приходится $n = 100$ витковъ (напримѣръ, толщина проволоки 0,5 мм.; 5 слоевъ) и длина катушки немного больше 1 метра (точнѣе $N = 10140$ витковъ). Изъ этого примѣра видно, что генри представляетъ практически пригодную единицу. Въ продажѣ имѣются нормальныя катушки съ самоиндукціею въ 1 генри, съ которыми можно сравнивать неизвѣстныя катушки самоиндукціи.

Коефіцієнтъ самоиндукціи L катушки можно нѣкоторымъ образомъ разсматривать, какъ полную величину инерціи магнитнаго поля катушки. Онъ зависитъ поэтому какъ отъ величины M (удѣльной инерціи), такъ и отъ размѣровъ катушки. Коефіцієнтъ самоиндукціи находится приблизительно въ такомъ отношеніи къ проницаемости, какъ емкость къ діэлектрической постоянной (§ 68).

ЭНЕРГІЯ МАГНИТНАГО ПОЛЯ.

317. Если катушку внезапно соединить съ источникомъ электричества, то въ теченіе нѣ котораго начальнаго періода токъ возрастаетъ

еть отъ нуля до конечнаго значенія J . Предположимъ, что за весьма короткую часть τ этого періода токъ возрастаетъ на ΔJ , причемъ его среднее значеніе за время τ есть J_τ , а напряженіе между зажимами равно V_τ . По теоремѣ Пойнтинга, за время τ переносится между зажимами энергія $V_\tau \cdot J_\tau$ ваттъ, т.-е. въ общемъ переносится $W_\tau = J_\tau \cdot V_\tau \cdot \tau$ джулей. Если R есть сопротивление катушки, то линейная сумма электрическаго напряженія вдоль витковъ катушки равняется $J_\tau \cdot R$. Поэтому энергія, вступающая чрезъ поверхность проволоки въ металл и превращающаяся здѣсь въ теплоту, равняется $R \cdot J_\tau \cdot J_\tau \cdot \tau$ джулямъ. Но это не вся энергія, такъ какъ напряженіе между зажимами больше: $V_\tau = V'_\tau + R \cdot J_\tau$, гдѣ V'_τ — напряженіе самоиндукціи; соотвѣтственно этому $W_\tau = V'_\tau \cdot J_\tau \cdot \tau + R \cdot J_\tau^2 \cdot \tau$. Первое слагаемое этой суммы $V'_\tau \cdot J_\tau \cdot \tau = W'_\tau$ представляетъ собою количество энергіи, которое проходитъ между зажимами, но не достигаетъ витковъ катушки, т.-е. остается въ окружающемъ катушку пространствѣ. Эту энергію поглощаетъ возрастающее магнитное поле за короткій промежутокъ времени τ . Если коэффициентъ самоиндукціи катушки равенъ L генри, то $V'_\tau = L \cdot \frac{\Delta J}{\tau}$, и потому приращеніе энергіи магнитнаго поля за малый промежутокъ времени τ равно $W'_\tau = V'_\tau \cdot J_\tau \cdot \tau = L \cdot J_\tau \cdot \Delta J$. Положимъ теперь, что ΔJ представляетъ собою n -ую часть конечнаго значенія силы тока, т.-е. что $\Delta J = J/n$, и обозначимъ черезъ $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n$ соотвѣтственные малые промежутки времени, за которые токъ возрастаетъ отъ 0 до ΔJ , отъ J до $2\Delta J$, отъ $2\Delta J$ до $3\Delta J$ отъ $(n-1) \cdot \Delta J$ до $n \cdot \Delta J = J$, считая отъ момента соединенія съ источникомъ электричества. Обозначимъ черезъ J_1, J_2, \dots, J_n среднія значенія силы тока за малые промежутки времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$; они образуютъ непрерывно возрастающій рядъ отъ 0 до J , и ихъ среднее значеніе равняется $\frac{1}{2}J$. Полное количество энергіи, приобрѣтаемой магнитнымъ полемъ, когда сила тока возрастаетъ до J , представится въ видѣ слѣдующей суммы:

$$W = W'_1 + W'_2 + \dots + W'_n = L \cdot J_1 \cdot \Delta J + L \cdot J_2 \cdot \Delta J + \dots + L \cdot J_n \cdot \Delta J = \\ = L \cdot \Delta J \cdot (J_1 + J_2 + \dots + J_n).$$

Если сюда подставить вмѣсто приращенія ΔJ его значеніе J/n , то получимъ:

$$W = L \cdot J \cdot \frac{1}{n} \cdot (J_1 + J_2 + \dots + J_n) = L \cdot J \cdot \frac{1}{2}J.$$

Такимъ образомъ, полная энергія магнитнаго поля равняется

$$W = \frac{1}{2} L \cdot J^2 \text{ джулей.}$$

Если черезъ катушку, имѣющую коэффициентъ самоиндукціи въ L генри, проходитъ токъ въ J амперъ, то энергія магнитнаго поля въ катушкѣ равняется половинѣ произведенія изъ коэффициента самоиндукціи на квадратъ силы тока т.-е. $W = \frac{1}{2} L \cdot J^2$ джулямъ.

318. Предположимъ, что B есть удѣльный силовой потокъ магнитнаго поля въ катушкѣ и ΔB — его приращеніе потока при возрастаніи тока на ΔJ . Если сѣченіе катушки равняется q кв. см., то число всѣхъ силовыхъ линий равно $q \cdot B$ и его приращеніе равняется $q \cdot \Delta B$. Если, далѣе, полное число витковъ на катушкѣ есть N , то напряженіе самоиндукціи за малое время τ , въ теченіе котораго B возрастаетъ на ΔB , равно $V'_\tau = N \cdot q \cdot \frac{\Delta B}{\tau}$. Если сила магнитнаго поля, выраженная въ амперъ-виткахъ на сантиметръ, равняется H и вся длина катушки есть l , то $l \cdot H$ есть полное число амперъ-витковъ; слѣдовательно, когда сила тока равняется J_τ амперамъ, то $l \cdot H = N \cdot J_\tau$ и $J_\tau = l \cdot H : N$. Отсюда слѣдуетъ, что энергія, получаемая магнитнымъ полемъ за малое время τ , равняется

$$V'_\tau \cdot J_\tau \cdot \tau = l \cdot q \cdot H \cdot \Delta B = v \cdot H \cdot \Delta B \text{ джулей,}$$

гдѣ v — объемъ катушки. На каждый кубическій сантиметръ ($v = 1$) поля приходится поэтому $H \cdot \Delta B$ джулей.

Если магнитное поле силы $H \frac{\text{амп.-витк.}}{\text{см.}}$ возрастаетъ, такъ что его удѣльный силовой потокъ увеличивается на $\Delta B \frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{куб. см.}}$, то оно получаетъ энергію въ количествѣ $H \cdot \Delta B$ джулей на одинъ кубическій сантиметръ.

Это положеніе справедливо и въ тѣхъ случаяхъ, къ которымъ непримѣнимъ принципъ наложенія (какъ въ ферромагнитныхъ средахъ, съ которыми мы ниже познакомимся подробнѣе).

Но въ тѣхъ случаяхъ, которые подчиняются принципу наложенія, мы можемъ для cadaго кубическаго сантиметра сдѣлать такое же вычисленіе, которое мы въ § 317 произвели для поля всей катушки. Такимъ путемъ мы получаемъ для плотности энергіи магнитнаго поля выраженіе

$$\sigma = \frac{1}{2} H \cdot B \frac{\text{джуль}}{\text{куб. см.}}$$

Эту формулу можно написать еще и такъ:

$$\sigma = \frac{1}{2} M \cdot H^2 = \frac{1}{2M} \cdot B^2.$$

Въ тѣхъ случаяхъ, когда принципъ наложенія имѣетъ силу, плотность энергіи магнитнаго поля возрастаетъ пропорціонально квадрату силы поля.

Когда тѣло, моментъ инерціи котораго равенъ K , вращается съ угловою скоростью ω , то энергія вращательнаго движенія равняется $\frac{1}{2} K \cdot \omega^2$. Эта формула вполне аналогична формулѣ $\sigma = \frac{1}{2} M H^2$. Въ модели ээира M есть инерція шариковъ, содержащихся въ одномъ кубическомъ сантиметрѣ, H — ихъ угловая скорость.

Полная энергія поля въ катушкѣ длины l и сѣченія q равняется $W = \frac{1}{2} l \cdot q \cdot H \cdot B$ джулямъ. Если N — число всѣхъ витковъ катушки, L — ея самоиндукція, J — сила тока, то $l \cdot H = N \cdot J \cdot q \cdot B = \frac{L \cdot J}{N}$ и, слѣдовательно, $W = \frac{1}{2} L \cdot J^2$.

СИЛОВЫЯ (ПОНДЕРОМОТОРНЫЯ) ДѢЙСТВІЯ ПОЛЯ НА МАГНИТНЫЕ ПОЛЮСЫ.

319. Весьма часто по энергіи магнитнаго поля можно вычислить тѣ механическія силы дѣйствія, которыя испытываютъ въ немъ постоянные магниты; мы можемъ это сдѣлать во всѣхъ тѣхъ случаяхъ, когда возможно пренебречь тѣми (мало извѣстными) измѣненіями, которыя испытываетъ внутреннее поле магнита при его перемѣщеніяхъ. Примѣромъ могутъ служить весьма тонкіе магнитные стержни, находящіеся въ обширномъ и сравнительно слабомъ полѣ. Въ этихъ случаяхъ нужно вычислить то измѣненіе энергіи ΔW , которое испытываетъ все внѣшнее поле при маломъ перемѣщеніи магнита. Отнимаемая отъ ээира энергія ΔW должна быть равна полученной при этомъ перемѣщеніи механической работѣ; отсюда можно опредѣлить силовое дѣйствіе, испытываемое магнитомъ, такъ какъ работа равна произведенію изъ силы на путь.

Если два магнитные стержня одинаковаго сѣченія съ плоскими основаніями расположены другъ противъ друга такимъ образомъ, что между гладкими разноименными полюсными поверхностями остается лишь узкая щель равномѣрной ширины, то поле въ этой щели,

какъ показываетъ рис. 143, можно считать однороднымъ. Пусть удѣльный силовой потокъ въ щели будетъ равенъ $B \frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{кв.-см.}}$, сѣченіе магнитовъ равно q , и разстояніе между полюсными поверхностями равно s . Въ такомъ случаѣ энергія поля, находящагося въ щели, равняется

$$W = \frac{1}{2 M_0} \cdot B^2 \cdot q \cdot s \text{ джулямъ.}$$

Если полюсныя поверхности сблизить на разстояніе Δs , то энергія уменьшается на величину

$$\Delta W = \frac{1}{2 M_0} \cdot B^2 \cdot q \cdot \Delta s \text{ джулямъ.}$$

Никакихъ другихъ измѣненій ни внутри магнитовъ ни внѣ ихъ не происходитъ. Мы имѣемъ такимъ образомъ случай, когда легко можно вычислить силу, дѣйствующую на магниты. Только-что вычисленное количество энергіи, теряемое магнитнымъ полемъ, приобрѣтается въ формѣ работы при перемѣщеніи Δs магнита. Эта работа равняется $P \Delta s$, гдѣ P — сила притяженія между магнитами; слѣдовательно,

$$P = \frac{1}{2 M_0} \cdot B^2 \cdot q.$$

За единицу силы мы беремъ величину, соответствующую энергіи въ 1 джюль, т.-е. 10^7 диновъ = 10,2 кгр.; эта единица не имѣетъ особаго наименованія. Если же за единицу силы принять килограммъ, то

$$P = \frac{10,2}{2 \cdot M_0} B^2 \cdot q \text{ кгр.}$$

Если за единицу силы принять динъ, то

$$P = \frac{10^7}{2 \cdot M_0} \cdot B^2 \cdot q \text{ диновъ.}$$

Эта формула выражаетъ также силу притяженія между полюсными поверхностями двухъ электромагнитовъ. Если, напримѣръ, $B = 10^{-4}$ (т.-е. 10000 *em*), то на каждый квадратный сантиметръ полюсной поверхности приходится сила, превышающая 4 килограмма.

СИЛОВЫЯ (ПОНДЕРОМОТОРНЫЯ) ДѢЙСТВІЯ МАГНИТНАГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИКЪ СЪ ТОКОМЪ.

320. Если черезъ однородное магнитное поле съ силовымъ потокомъ въ $B \frac{\text{вольтъ сек.}}{\text{кв. см.}}$ движется со скоростью $v \frac{\text{см.}}{\text{сек.}}$ длинный пря-

мой проводъ, по которому течетъ токъ въ J амперъ, то въ каждомъ сантиметрѣ проволоки возникаетъ индуктированная электродвижущая сила, равная $V \cdot v$ вольтъ. Такъ какъ энергія поля при этомъ движеніи не измѣняется, то получаемая при перемѣщеніи работа доставляется всецѣло источникомъ тока въ видѣ энергіи $J \cdot V \cdot v$. За время t проволока перемѣщается на разстояніе $s = v \cdot t$, и въ каждомъ сантиметрѣ проволоки энергія $J \cdot V \cdot v \cdot t = J \cdot V \cdot s$ доставляется эвиромъ на производство работы. Отсюда непосредственно слѣдуетъ, что на каждый сантиметръ проволоки дѣйствуетъ сила $P = J \cdot V$.

Прямолинейный проводникъ съ токомъ въ J амперъ испытываетъ въ магнитномъ полѣ съ силовымъ потокомъ $V \frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{кв. см.}}$, силовые линіи котораго перпендикулярны къ проводнику, силовое дѣйствіе, направленное перпендикулярно какъ къ J , такъ и къ V , и равное $V \cdot J$ на сантиметръ. За единицу силы при этомъ берется 10^7 диновъ = 10,2 кгр.

Это предложеніе даетъ намъ дѣйствіе магнитнаго поля на движущіеся іоны и электроны въ формѣ механической силы, тогда какъ раньше (§ 296) мы измѣряли его чисто электрически, какъ индуктированную электродвижущую силу. При вычисленіяхъ, относящихся къ катоднымъ и каналовымъ лучамъ (§ 150), мы уже пользовались приведенной здѣсь формулой.

Нужно, однако, замѣтить, что сила, дѣйствующая на проволоку съ токомъ въ магнитномъ полѣ, пропорціональна силѣ тока лишь въ тѣхъ случаяхъ, которые подчиняются принципу наложенія. Напримеръ, для желѣзной проволоки при большихъ силахъ тока эта пропорціональность не имѣетъ мѣста, такъ какъ поле тока вызываетъ въ магнитномъ полѣ измѣненія, которыя оказываютъ вліяніе на силовое дѣйствіе. Лишь въ тѣхъ случаяхъ, когда имѣетъ мѣсто принципъ наложенія, эти дѣйствія поля тока уничтожаются, и сила пропорціональна J . На этомъ основана возможность измѣрять энергію при помощи электродинамометра, какъ описано въ § 288.

321. Изъ только-что доказаннаго предложенія мы видимъ, что магнитный силовой потокъ V можетъ быть измѣряемъ также и помощью механическихъ силовыхъ дѣйствій. Для этой цѣли проще всего пользоваться соленоидомъ. Если небольшой проволочный прямоугольникъ, стороны котораго равны a и b и по которому проходитъ токъ въ J амперъ, помѣстить такъ, чтобы одна его сторона

была параллельна линіямъ магнитнаго поля B , то онъ получаетъ моментъ вращенія Q вокругъ оси, перпендикулярной къ B , при чемъ $Q = B \cdot J \cdot a \cdot b \doteq B \cdot J \cdot q$, гдѣ q — площадь прямоугольника. Эта же формула вѣрна и для малаго замкнутаго тока любой формы, если его поверхность q параллельна направленію B . Поэтому соленоидъ, который состоитъ изъ N малыхъ круговыхъ токовъ и ось котораго перпендикулярна къ направленію поля, получаетъ моментъ вращенія

$$Q = N \cdot q \cdot J \cdot B.$$

Величина $N \cdot q \cdot J = M$ часто называется магнитнымъ моментомъ соленоида; такимъ образомъ,

$$Q = B \cdot M.$$

Магнитный моментъ соленоида имѣетъ еще и другое значеніе: имъ опредѣляется величина собственнаго магнитнаго поля соленоида на большихъ разстояніяхъ. Поэтому можно, не опредѣляя величинъ q , J , N въ отдѣльности, опредѣлить M , измѣривъ поле на большомъ разстояніи отъ соленоида.

Это обстоятельство имѣетъ особенно важное значеніе потому, что оно позволяетъ намъ замѣнять соленоидъ магнитнымъ стержнемъ. Магнитный стержень, имѣющій на большомъ разстояніи вокругъ себя точно такое же поле, какъ и соленоидъ съ магнитнымъ моментомъ M , согласно принципу равенства дѣйствія и противодѣйствія, испытываетъ въ данномъ магнитномъ полѣ B такое же самое силовое дѣйствіе, какъ и этотъ соленоидъ, т.-е. получаетъ моментъ вращенія $Q = B \cdot M$. M называется тогда магнитнымъ моментомъ магнитнаго стержня.

ИЗМѢРЕНІЕ ЗЕМНОГО ПОЛЯ ПО МЕТОДУ ГАУССА.

322. Намѣченный сейчасъ способъ измѣренія поля по его механическимъ силовымъ дѣйствіямъ является не самымъ простымъ, хотя и наиболѣе старымъ. Онъ былъ разработанъ еще Гауссомъ, который примѣнилъ его къ измѣренію земнаго поля. По методу Гаусса сначала измѣряется моментъ вращенія Q , получаемый постояннымъ магнитнымъ стержнемъ, когда его ось направлена перпендикулярно къ земному полю. Если неизвѣстный магнитный моментъ стержня есть M , то $Q = B \cdot M$. Чтобы найти M , помѣщаютъ стержень на опредѣленномъ разстояніи отъ буссоли и располагаютъ его

такъ, чтобы поле магнитнаго стержня въ томъ мѣстѣ, гдѣ находится буссоль, было перпендикулярно, къ земному полю. Если при этомъ на буссоли наблюдается отклоненіе α , то отношеніе поля B' стержня къ земному полю B вычисляется изъ уравненія $B = B' \cdot \cotg \alpha$ (§ 232). Но значеніе B' пропорціонально M , а именно $B' = B_0 M$, гдѣ B_0 — значеніе поля магнитнаго стержня на такомъ же точно разстояніи отъ стержня, когда его магнитный моментъ равенъ единицѣ. Слѣдовательно, $B = M \cdot B_0 \cotg \alpha$. Величину B_0 нѣтъ необходимости опредѣлять эмпирически; принимая для M_0 опредѣленное значеніе, можно найти B_0 чисто математическимъ путемъ, такъ какъ все магнитное поле, окружающее магнитный стержень, можетъ быть выражено простыми математическими формулами. Такимъ образомъ можно вычислить отношеніе $B : M = B_0 \cotg \alpha$; мы обозначимъ его черезъ C . Зная $Q = M \cdot B$ и $C = B : M$, мы найдемъ и $B = \sqrt{Q \cdot C}$.

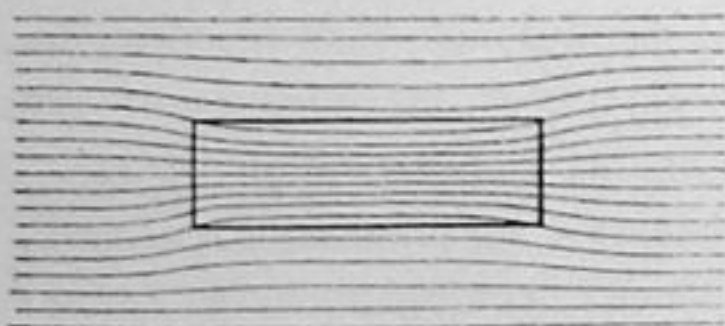
Этотъ методъ совершенно не требуетъ градуированныхъ измѣрительныхъ инструментовъ или эталоновъ, установленныхъ международными соглашеніями. Въ эпоху Гаусса это было, дѣйствительно, единственный возможный способъ для измѣренія величины земного поля въ строго опредѣленныхъ единицахъ.

ПАРАМАГНИТНЫЯ И ДІАМАГНИТНЫЯ ВЕЩЕСТВА.

323. Проницаемость большинства веществъ почти не отличается отъ проницаемости пустоты. Катушка можетъ быть внутри пустою или заполнена воздухомъ, водою, масломъ, деревомъ или инымъ веществомъ, не содержащимъ желѣза и другихъ ферромагнитныхъ тѣлъ (съ ними мы познакомимся ниже), — самоиндукція отъ этого не измѣняется сколько-нибудь замѣтнымъ образомъ.

Однако, нѣкоторое весьма малое различіе въ проницаемости этихъ тѣлъ все-таки существуетъ; это можно замѣтить по малымъ механическимъ силамъ, дѣйствіе которыхъ испытываютъ почти всѣ тѣла въ очень сильныхъ магнитныхъ поляхъ. Если въ поле магнита, изъ полюсовъ котораго исходитъ постоянный силовой потокъ, внести тѣло, проницаемость котораго больше проницаемости окружающей среды, то энергія поля нѣсколько уменьшится, какъ это слѣдуетъ изъ формулы $\sigma = \frac{1}{2M} B^2$ для плотности энергіи (§318). Отдаваемая полемъ энергія можетъ быть получена въ формѣ работы, и тѣло увлекается силовымъ дѣйствіемъ поля въ область наибольшей плотности

силового потока. Если, наоборот, проницаемость тѣла меньше проницаемости среды, то оно выталкивается изъ поля. Если тѣлу придать форму стерженька и подвѣсить его въ сильномъ однородномъ полѣ, то въ случаѣ, если его проницаемость больше проницаемости окружающей среды, оно установится параллельно направленію силовыхъ линій и получитъ слабое индуктированное намагниченіе, направленіе котораго совпадаетъ съ направлениемъ поля. Если проницаемость тѣла меньше, чѣмъ проницаемость окружающей среды, то оно получаетъ индуктированное намагниченіе, противоположное направленію поля, и стерженекъ устанавливается перпендикулярно къ силовымъ линіямъ (рис. 220 и 221).



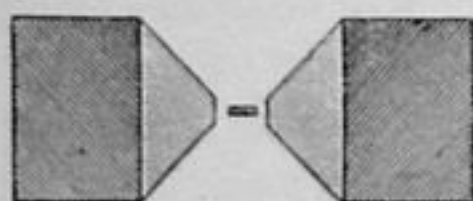
Парамагнитный стержень.



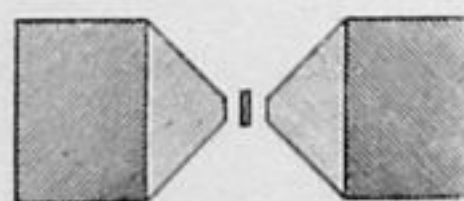
Діамагнитный стержень.

Рис. 220. Силовой потокъ въ стержнѣ.

Подобнаго рода опыты въ пустотѣ показали, что существуютъ какъ тѣла съ проницаемостью, немного большей, нежели проницаемость чистаго эѳира, такъ и тѣла съ проницаемостью, немного меньшей, чѣмъ проницаемость эѳира.



Парамагнитный стерженекъ.



Діамагнитный стерженекъ.

Рис. 221. Положеніе стерженька въ магнитномъ полѣ.

Тѣла, проницаемость которыхъ больше, нежели проницаемость пустоты, называются парамагнитными, а тѣла, проницаемость которыхъ меньше, чѣмъ проницаемость пустоты, называются діамагнитными.

Діамагнитнымъ въ сильной степени является висмутъ; парамагнитны платина, палладій, желѣзныя соли (напримѣръ, хлористое желѣзо, силикаты желѣза и др.)

Отношеніе $M : M_0 = \mu$ абсолютной проницаемости ве-

щества къ проницаемости эѳира носить названіе удѣльной проницаемости этого вещества.

Если рѣчь идетъ просто о проницаемости, то всегда подразумѣвается именно удѣльная проницаемость.

Разность между удѣльной проницаемостью вещества и единицей, т.-е. величина $\mu - 1$, называется магнитной воспримчивостью этого вещества.

Такъ какъ проницаемость парамагнитнаго вещества больше 1, то воспримчивость такого вещества есть величина положительная; напротивъ, проницаемость діамагнитнаго вещества меньше 1, и воспримчивость его поэтому выражается отрицательнымъ числомъ. Въ литературѣ обычно, безъ особыхъ для того оснований, воспримчивостью называютъ менѣе удобную величину $\frac{\mu - 1}{4\pi}$. Многочисленныя точныя измѣренія доказали, что съ большою точностью можно считать справедливымъ слѣдующій законъ:

Проницаемость парамагнитныхъ и діамагнитныхъ тѣлъ не измѣняется съ силой поля.

Слѣдовательно, въ парамагнитныхъ и діамагнитныхъ средахъ принципъ наложенія имѣетъ такую же силу, какъ и въ чистомъ эѳирѣ.

ИЗМѢРЕНІЯ ВОСПРИМЧИВОСТИ.

324. Воспримчивость жидкости опредѣляется сравнительно просто по силовымъ дѣйствіямъ, испытываемымъ жидкостью въ магнитномъ полѣ. Жидкость наливается въ двѣ сообщающіяся трубки, изъ которыхъ одна помѣщается въ магнитномъ полѣ такъ, чтобы вершина жидкости находилась въ возможно болѣе однородной части магнитнаго поля; другая трубка помѣщается вдали внѣ магнитнаго поля. Какъ только мы возбудимъ поле, между высотами уровней жидкости въ обоихъ колѣнахъ обнаруживается разность. Парамагнитная жидкость въ магнитномъ полѣ слегка поднимается, діамагнитная — слегка опускается. Если B — сила магнитнаго силового потока въ вольтъ-секундахъ на квадратный сантиметръ, M' — проницаемость воздуха, M — проницаемость жидкости, то энергія поля, приходящаяся на кубическій сантиметръ, въ воздухѣ составляетъ $B^2 : 2M'$, въ жидкости — $B^2 : 2M$. Если малую высоту поднятія жидкости обозначимъ черезъ δ , а сѣченіе трубки черезъ q , то магнитное поле отдаетъ энергію

$$\left(\frac{B^2}{2M'} - \frac{B^2}{2M} \right) \cdot q \cdot \delta = B^2 \cdot q \cdot \delta \cdot \frac{M - M'}{2M \cdot M'}$$

Отсюда видно, что на менискъ жидкости дѣйствуетъ сила

$$P = B^2 \cdot \frac{M - M'}{2M \cdot M'} \cdot q.$$

Какъ мы увидимъ ниже, M и M' отличаются отъ M_0 менѣе, чѣмъ на одну промилле; поэтому мы можемъ съ вполнѣ достаточною точностью замѣнить въ знаменателѣ $M \cdot M'$ черезъ M_0^2 . Такимъ образомъ мы получимъ

$$P = \frac{B^2}{2M_0} \cdot (\mu - \mu') \cdot q,$$

гдѣ μ и μ' суть удѣльныя проницаемости жидкости и воздуха. Если за единицу силы мы примемъ вѣсъ 1 грамма, то

$$P = \frac{B^2}{2M_0} \cdot (\mu - \mu') \cdot q \cdot 10,2 \cdot 10^3 = 0,406 \cdot 10^{12} \cdot B^2 \cdot (\mu - \mu') \cdot q \text{ граммъ}$$

Эта магнитная сила P должна уравновѣшиваться давленіемъ, которое соотвѣтствуетъ разности уровней жидкости, вызванной магнитнымъ полемъ. Если эта разность уровней равняется h см. и удѣльный вѣсъ жидкости есть s , то давленіе, дѣйствующее на менискъ жидкости, равняется $P = h \cdot s \cdot q$. Слѣдовательно,

$$h \cdot s = 0,406 \cdot 10^{12} \cdot B^2 \cdot (\mu - \mu').$$

Измѣривъ B , h , s , можно найти $\mu - \mu'$. Если удалить воздухъ, находящійся надъ жидкостью въ обѣихъ трубкахъ, то устанавливается нѣсколько иная разность уровней h' , при чемъ:

$$\begin{aligned} h' \cdot s &= 0,406 \cdot 10^{12} \cdot B^2 \cdot (\mu - 1); \\ (h' - h) \cdot s &= 0,406 \cdot 10^{12} \cdot B^2 \cdot (\mu' - 1). \end{aligned}$$

Такимъ образомъ опредѣляются воспримчивости воздуха и жидкости. Если же пространство надъ жидкостью наполнить вмѣсто воздуха инымъ газомъ, то, сравнивая соотвѣтственную разность уровней съ величиной h' , можно опредѣлить воспримчивость этого газа.

Описанный методъ былъ впервые разработанъ и примененъ Г. Квинке (G. Quincke).

Нѣсколько труднѣе опредѣлить воспримчивости твердыхъ тѣлъ; удобнѣе всего пользоваться для этой цѣли непрямимъ методомъ. Если ввести въ магнитное поле стерженекъ такъ, чтобы онъ составлялъ острый уголъ съ направлениемъ силовыхъ линий, то онъ получитъ моментъ вращенія, пропорціональный $\mu - \mu'$, гдѣ μ — проницаемость вещества стерженька, μ' — проницаемость той жидкой или

газообразной среды, въ которой подвѣшенъ стерженекъ. Последовательно вводя въ поле различныя жидкости, проницаемость которыхъ извѣстна, и подвѣшивая стерженекъ всякій разъ въ совершенно одинаковомъ положеніи относительно поля, мы измѣряемъ моментъ вращенія. Посредствомъ интерполированія, а въ случаѣ необходимости и экстраполированія, мы теперь легко опредѣлимъ, какова должна быть проницаемость жидкости, чтобы моментъ вращенія былъ равенъ нулю. Это значеніе проницаемости и есть искомая проницаемость вещества стерженька. Въ слѣдующей таблицѣ даны нѣкоторыя изъ полученныхъ такимъ способомъ чисель.

Парамагнитныя тѣла	$\mu - 1$	Діамагнитныя тѣла	$\mu - 1$
Азотъ	+ 0,01 . 10 ⁻⁶	Алкоголь	- 8,2 . 10 ⁻⁶
Воздухъ	+ 0,32 . 10 ⁻⁶	Вода	- 9,8 . 10 ⁻⁶
Кислородъ	+ 1,26 . 10 ⁻⁶	Каменная соль	- 13 . 10 ⁻⁶
Олово	+ 3,8 . 10 ⁻⁶	Мѣдь	- 10 . 10 ⁻⁶
Алюминій	+ 23 . 10 ⁻⁶	Цинкъ	- 13 . 10 ⁻⁶
Платина	+ 365 . 10 ⁻⁶	Серебро	- 19 . 10 ⁻⁶
Палладій	+ 700 . 10 ⁻⁶	Ртуть	- 25 . 10 ⁻⁶
28% растворъ хлорнаго желѣза (уд. вѣсъ 1,27)	+ 384 . 10 ⁻⁶	Золото	- 38 . 10 ⁻⁶
48% растворъ хлорнаго желѣза (уд. вѣсъ 1,51)	+ 805 . 10 ⁻⁶	Висмутъ	- 176 . 10 ⁻⁶

Парамагнитны не только растворы всѣхъ желѣзныхъ солей, но также и всѣ растворы марганцовыхъ, кобальтовыхъ, никкелевыхъ и хромовыхъ солей. Замѣчательно, что и растворы мѣдныхъ соединеній ясно парамагнитны, хотя сама мѣдь діамагнитна.

ИЗМѢРЕНІЕ ПОЛЯ ПО ВЫСОТѢ ПОДНЯТІЯ ЖИДКОСТИ.

325. Если мы наполнимъ двѣ сообщающіяся трубки жидкостью, воспримчивость которой извѣстна, и одинъ менискъ жидкости помѣстимъ въ магнитномъ полѣ, то по вызываемой дѣйствіемъ поля разности уровней h мы можемъ опредѣлить силу поля въ томъ мѣстѣ, гдѣ находится менискъ. Именно,

$$B = C \cdot \sqrt{h},$$

гдѣ

$$C = \sqrt{\frac{1}{0,406 \cdot 10^{12}} \cdot \frac{s}{\mu - \mu'}} = 1,57 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{s}{\mu - \mu'}}.$$

Здѣсь s обозначаетъ удѣльный вѣсъ жидкости, μ и μ' — удѣльныя проницаемости жидкости и воздуха.

Для измѣреній особенно удобны растворы хлорнаго желѣза. По изслѣдованіямъ І. Кенигсбергера (J. Königsberger) величина $\frac{\mu - \mu'}{s}$ для любой концентраціи такого раствора весьма точно опредѣляется по формулѣ

$$\frac{\mu - \mu'}{s} \cdot 10^6 = 1101 \cdot p - 9,8 \cdot (1 - p),$$

гдѣ p есть количество соли (FeCl_3) на одну вѣсовую единицу раствора, а $1 - p$ соотвѣтственное количество воды.

ТЕОРІЯ ПАРАМАГНІТИЗМА И ДІАМАГНІТИЗМА.

326. Явленія, обнаруживаемыя парамагнитными тѣлами въ магнитномъ полѣ, вполне аналогичны явленіямъ, обнаруживаемымъ діэлектрикомъ въ электрическомъ полѣ. Мы можемъ поэтому объяснить себѣ парамагнитизмъ такимъ же образомъ, какъ діэлектрическія свойства матеріальныхъ тѣлъ. Мы принимаемъ, что въ парамагнитномъ тѣлѣ содержится большое число маленькихъ молекулярныхъ магнитовъ (§ 291), которые удерживаются молекулярными силами въ опредѣленныхъ положеніяхъ такимъ образомъ, что въ полѣ, сила котораго равна нулю, они имѣютъ всевозможныя направленія безъ преобладанія одного какого-либо направленія. Если такое тѣло внести въ поле, то всѣ магнитики слегка отклоняются, такъ что направленіе, соотвѣтствующее направленію поля, становится преобладающимъ; отклоненія пропорціональны силѣ поля. Если удалимъ поле, то магнитики возвращаются въ свои первоначальныя положенія.

Дѣйствіе магнитнаго поля, вызывающее діамагнитизмъ, совершенно отличается отъ дѣйствія, вызывающаго парамагнитизмъ. Оба эти дѣйствія, вѣроятно, всегда одновременны, но преобладаетъ то одно изъ нихъ, то другое. Согласно теоріи, развитой въ § 291, молекулярный магнитъ представляетъ собой молекулу съ вращающимися электронами. Но магнитное поле само можетъ вызвать вращеніе

електроновъ, содержащихся въ молекулѣ, такъ какъ при возникновеніи магнитнаго поля и при всѣхъ его измѣненіяхъ появляются электрическія силы, линейная сумма которыхъ вдоль замкнутыхъ кривыхъ отлична отъ нуля. Эти интрамолекулярныя движенія электроновъ, вызываемыя возникновеніемъ магнитнаго поля, совершаются въ противоположность „индуктированнымъ ударамъ напряженія“ въ обыкновенныхъ проводникахъ все время, пока поле остается постояннымъ, такъ какъ эти движенія не требуютъ никакой затраты энергіи. При исчезновеніи же магнитнаго поля, вызываемыя этимъ силы противоположнаго направленія вновь возвращаютъ электроны въ состояніе покоя. Скорость вращенія, т.-е. намагниченіе молекулярныхъ магнитовъ, вызванное самымъ полемъ, всегда пропорціональна суммѣ индуктированныхъ напряженій по времени, или, что то же, силовому потоку магнитнаго поля. Индуктированныя въ молекулахъ замкнутые токи, согласно законамъ индукціи, направлены такимъ образомъ, что они ослабляютъ индуктирующее поле; поэтому молекулярныя магнитики располагаются въ направленіи, противоположномъ полю. Эти именно молекулярныя магнитики, возбужденныя самымъ магнитнымъ полемъ, и вызываютъ діамагнітизмъ.

Что индуктированныя электродвижуція силы дѣйствительно могутъ вызвать діамагнитныя дѣйствія, можно показать при помощи очень красиваго опыта съ пламенемъ свѣчи; какъ только мы внесемъ снизу въ междуполюсное пространство сильнаго электромагнита пламя, оно тотчасъ раздувается въ обѣ стороны и такимъ образомъ увлекается отъ сильныхъ частей поля къ слабымъ, какъ если бы оно было діамагнитнымъ. Это явленіе легко объясняется тѣмъ, что магнитное поле дѣйствуетъ на іоны поднимающихся вверхъ проводящихъ газовъ пламени съ силами, которыя гонятъ іоны изъ поля въ обѣ стороны. Движущіеся іоны увлекаютъ съ собою остальные газы, вслѣдствіе чего и самое пламя выталкивается изъ магнитнаго поля.

ФЕРРОМАГНИТНЫЯ ВЕЩЕСТВА.

327. Если въ проволочную катушку вставленъ желѣзный сердечникъ, то этимъ ея самоиндукція замѣтно повышается (§ 310). Это значитъ, что проницаемость желѣза несравненно больше проницаемости чистаго эѳира. Измѣреніемъ самоиндукціи можно непосредственно опредѣлить проницаемость желѣза. Съ этой цѣлью бе-

рется желѣзное кольцо равномерной толщины, снабженное равномерной обмоткой изъ изолированной проволоки. Черезъ обмотку будемъ пропускать токъ и измѣримъ, съ одной стороны, число амперъ-витковъ амперметромъ, а, съ другой стороны, посредствомъ баллистическаго инструмента, приключеннаго къ зажимамъ обмотки, измѣримъ ударъ напряженія, сопровождающій измѣренное измѣненіе числа амперъ-витковъ. Отсюда можно опредѣлить самоиндукцію замкнутаго соленоида и проницаемость желѣзнаго сердечника. Это вычисленіе весьма простое, такъ какъ все магнитное поле проходитъ внутри желѣза и кромѣ того почти однородно. Произведе-

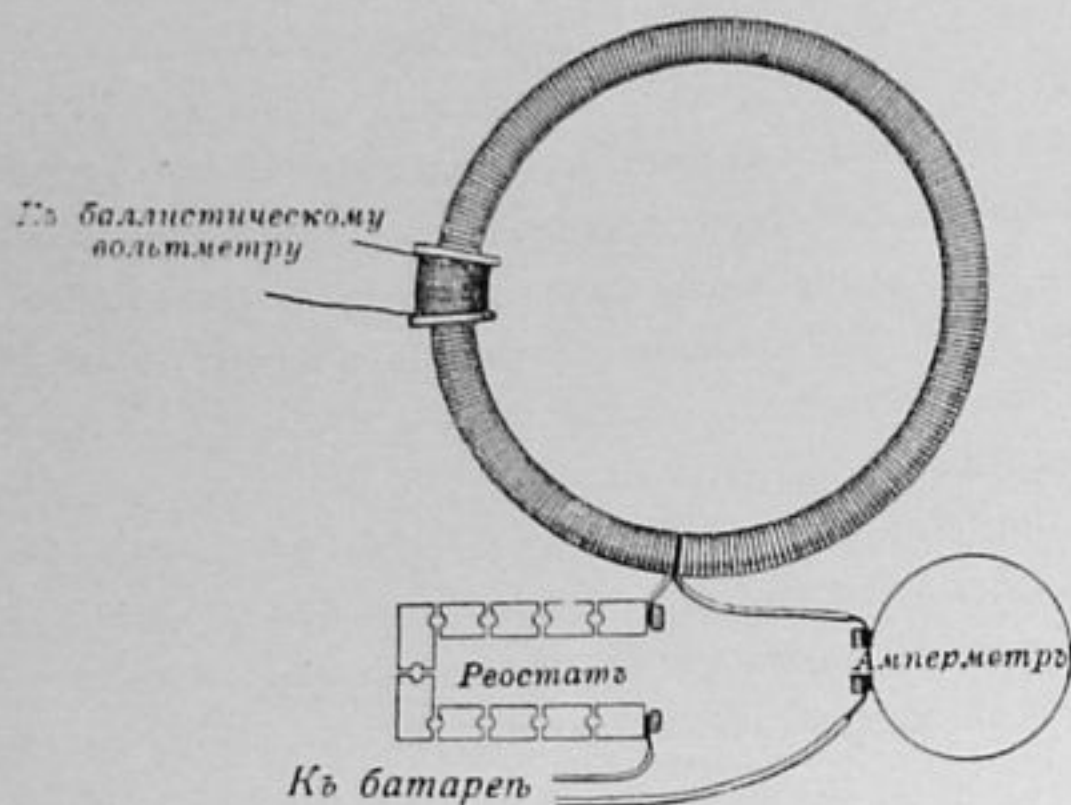


Рис. 222. Измѣреніе проницаемости желѣзнаго кольца.

измѣренной силы тока J на число витковъ, приходящееся на 1 сантиметръ, непосредственно даетъ намъ силу магнитнаго поля H въ желѣзѣ. Сумма всѣхъ наблюдаемыхъ ударовъ напряженія при возрастаніи тока отъ 0 до J , раздѣленная на число всѣхъ витковъ катушки и сѣченіе желѣзнаго сердечника, дастъ намъ величину B . Мы можемъ поэтому сейчасъ же вычислить также $M = B : H$ и $\mu = M : M_0$. Такъ какъ обычно ищутъ только величину удѣльной проницаемости μ , то вмѣсто H вычисляютъ прямо $M_0 \mu$, и затѣмъ находятъ $\mu = B : M_0 H$.

Въ большинствѣ случаевъ удобнѣе для опредѣленія B измѣрить ударъ напряженія между зажимами небольшой „вторичной катушки“, изолированной отъ намагничивающей обмотки, какъ показано на рис. 222, изображающемъ схему соединеній. Въ нижеслѣ-

дующей таблицѣ приведены результаты ряда измѣреній, сдѣланныхъ Юингомъ (Ewing) надъ кольцомъ изъ мягкаго желѣза.

$M_0 \cdot H \cdot 10^8$	Баллистическое отклоненіе	Сумма отклоненій	$B \cdot 10^8$	μ
0,13	1,1	1,1	26	200
0,26	1,1	2,2	53	204
0,30	0,5	2,7	65	216
0,40	0,8	3,5	84	210
0,53	1,0	4,5	107	202
0,71	2,1	6,6	158	223
0,93	2,9	9,5	227	243
1,31	3,9	13,4	320	245
1,69	9,2	22,6	540	320
1,89	6,9	29,5	705	370
2,78	77,5	107,0	2 560	920
3,36	78,7	185,7	4 440	1 320
4,01	82,0	267,7	6 400	1 600
4,95	91,5	359,2	8 580	1 740
5,86	57,0	416,2	9 940	1 700
7,20	57,0	473,2	11 300	1 570
8,10	23,5	496,7	11 870	1 460
9,14	24,0	520,7	12 440	1 360

Эти данныя представлены графически въ видѣ кривой на рис. 223. Сразу видно, что о приложимости принципа наложенія къ желѣзу не можетъ быть и рѣчи. Характерно для этой кривой, выражающей зависимость между B и H , что при малыхъ силахъ поля она поднимается сравнительно медленно ($\mu = 210$ въ среднемъ), но при значеніяхъ $B \cdot 10^8$ отъ 1 000 до 10 000 кривая сразу поднимается очень круто, такъ что μ возрастаетъ до 1700, а затѣмъ при значеніяхъ $B \cdot 10^8$, превышающихъ 10 000, постепенно загибается обратно. Продолжая измѣренія, можно убѣдиться, что при значеніяхъ $B \cdot 10^8$, превышающихъ

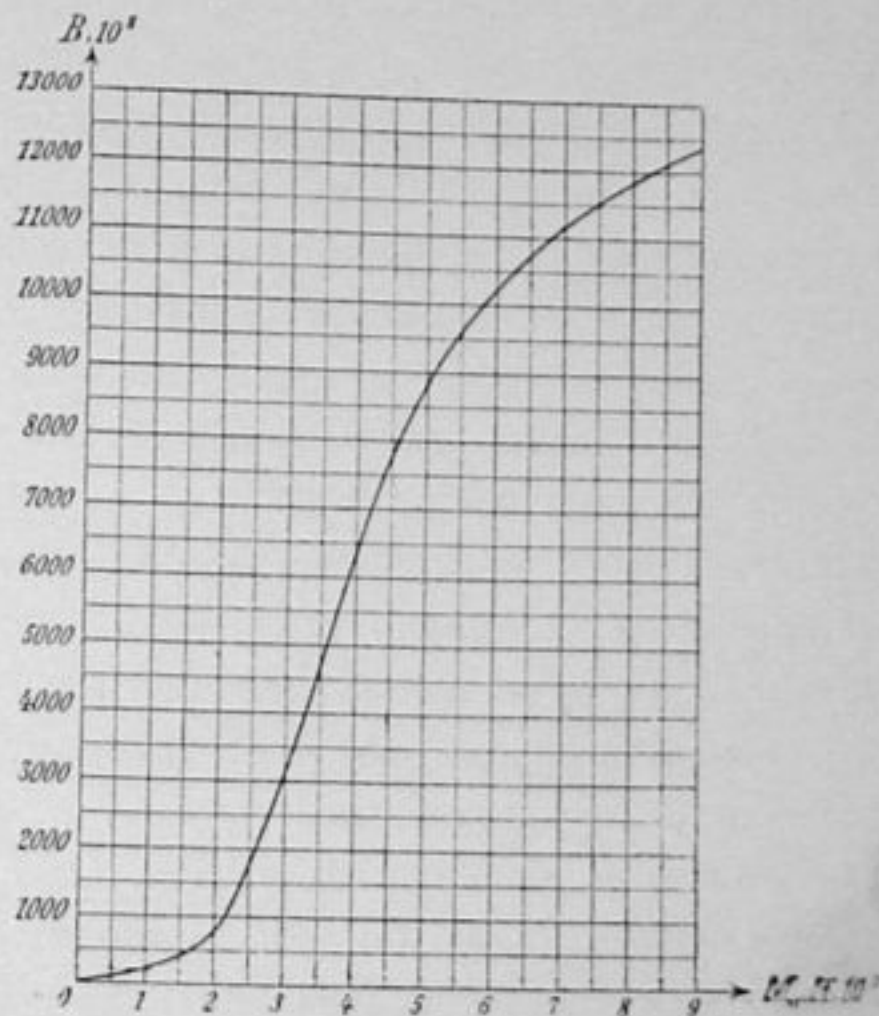


Рис. 223. Кривая намагниченія мягкаго желѣза.

13000, кривая становится, наконецъ, почти горизонтальной. При этомъ желѣзо находится, какъ говорятъ, въ состояніи „магнитнаго насыщенія“.

Ферромагнитныя вещества характеризуются тѣмъ, что ихъ проницаемость, во-первыхъ, весьма велика и, во-вторыхъ, зависитъ отъ силы поля. Для слабыхъ полей ихъ проницаемость меньше, чѣмъ для болѣе сильныхъ, а въ весьма сильныхъ поляхъ они приближаются къ состоянію магнитнаго насыщенія. Такимъ образомъ, существуетъ определенная сила поля, при которой проницаемость ферромагнитнаго вещества имѣетъ максимумъ.

Разность $B - M_0H = \mathfrak{M}$ называютъ намагниченіемъ. Для парамагнитныхъ и діамагнитныхъ веществъ намагниченіе близко къ нулю; для ферромагнитныхъ же тѣлъ оно весьма велико и почти не отличается отъ B .

МАГНИТНЫЯ ЦѢПИ.

328. Магнитными цѣпями называются магнитныя силовыя трубки, проходящія частью черезъ ферромагнитныя, частью же черезъ не-ферромагнитныя вещества; таковы, напримѣръ, силовыя линіи катушки съ желѣзнымъ сердечникомъ. Для всѣхъ магнитныхъ цѣпей сохраняетъ силу основное положеніе, по которому число всѣхъ амперъ-витковъ вдоль какой-либо изъ замкнутыхъ силовыхъ линій всегда равняется числу амперъ-витковъ намагничивающей катушки, внутри которой проходитъ эта линія. Мы можемъ поэтому узнать число всѣхъ амперъ-витковъ силовой линіи, измѣривъ токъ въ намагничивающей катушкѣ. Но трудно сказать, сколько изъ этого числа амперъ-витковъ приходится на внутреннее поле въ желѣзѣ и сколько — на внѣшнее поле, такъ какъ присутствіе желѣза оказываетъ сильное вліяніе на внѣшнее поле, а именно усиливаетъ его, вслѣдствіе чего внутреннее число амперъ-витковъ меньше, чѣмъ въ катушкѣ безъ желѣза.

Основной законъ, согласно которому магнитный силовой потокъ идетъ лишь по замкнутымъ путямъ, остается справедливымъ также для сложныхъ магнитныхъ цѣпей. Согласно этому изъ полюса намагниченнаго желѣзнаго стержня выходитъ столько же линій индукціи, сколько ихъ внутри желѣза идетъ къ полюсу. Число этихъ индукціонныхъ линій можно измѣрить при помощи проволочной окружности, охватывающей стержень вблизи полюсной поверхности; ударъ на-

пряжения при каком-либо изменении поля всегда равен изменению числа индукционных линий, которая пронизывают поверхность, ограниченную проводочной окружностью. Но через эту окружность можно провести много поверхностей, как проходящих снаружи, т.-е. огибающих полюсы, так и пересекающих железо. На всех этих поверхностях изменение силового потока одинаково; так как это справедливо, вообще, с момента возникновения поля, то в действительности общее число индукционных линий внутри и снаружи одинаково.

Оба основных закона магнитного поля очень сходны с законами электрического тока. Если мы замкнем проводящей цепью гальваническую батарею, то, во-первых, полное напряжение вдоль каждой линии тока будет одинаково и равно электродвижущей силе батареи и, во-вторых, электрический ток будет протекать по замкнутым линиям.

Линии магнитного силового потока в каком-либо замкнутом кольце идут совершенно так же, как распространялись бы линии электрического тока в кольце такой же формы, если бы проводимость кольца, через которое идет ток, была повсюду равна проницаемости кольца, пронизываемого магнитным силовым потоком, а электродвижущая сила в цепи с током была равна числу ампер-витков магнитной цепи.

Термин „магнитный силовой поток“ был введен вместо старого термина „индукция“ именно для того, чтобы указать на аналогию с электрическим током. Число ампер-витков магнитной цепи часто называют „намагничивающей силой“ или „магнитодвижущей силой“. По тем же соображениям было введено понятие „магнитного сопротивления“. Если сечение отрезка силовой трубки есть q , его длина равна l и абсолютное значение проницаемости в рассматриваемом месте есть M , то „магнитное сопротивление“ этого отрезка силовой трубки вычисляется, подобно электрическому сопротивлению (§ 263), по формуле

$$R = \frac{l}{q \cdot M}.$$

Если полный силовой поток в отрезке силовой трубки есть $F = B \cdot q$ и число ампер-витков равно $A = H \cdot l$, то

$$F = q \cdot M \cdot \frac{A}{l} = \frac{A}{R}.$$

Эта формула выражаетъ „законъ Ома“ для магнитнаго силового потока. Слѣдуетъ, однако, замѣтить, что въ ферромагнитныхъ тѣлахъ величина R не есть постоянная.

Говоря языкомъ этой аналогіи, ферромагнитныя вещества отличаются отъ всѣхъ другихъ своей несравненно бѣльшей проводимостью для магнитнаго силового потока. По сравненію съ ними прочія вещества являются какъ бы полупроводниками. Вслѣдствіе этого кусокъ желѣза, находящійся въ магнитномъ полѣ, втягиваетъ въ себя магнитныя силовыя линіи (рис. 144), а желѣзный цилиндръ не пропускаетъ поля въ свою полость (рис. 145).

329. Очень просто вычисляется магнитное поле, находящееся бѣльшей частью въ желѣзѣ и встрѣчающее лишь узкій воздушный путь. Практически мы имѣемъ подобный случай въ электромагнитахъ съ полюсными башмаками, между которыми оставлена лишь узкая воздушная щель. Сюда же относятся электромагниты динамо-машинъ и электромоторовъ, „магнитно замыкаемые“ желѣзными якорями такъ, что съ обѣихъ сторонъ якоря остается лишь узкое промежуточное пространство. Покажемъ на небольшомъ численномъ примѣрѣ вліяніе воздушнаго промежутка, представляющаго собою тонкій плохо проводящій слой даже въ весьма хорошемъ магнитномъ проводникѣ. Желѣзное кольцо постоянного сѣченія q , средняя линія котораго имѣетъ длину l , разрѣзано въ одномъ мѣстѣ такъ, что получилась воздушная щель ширины δ . Удѣльная индукція равна B ; въ такомъ случаѣ силовой потокъ равенъ $F = B \cdot q$. Если число оборотовъ катушки обозначимъ черезъ N , а намагничивающій токъ черезъ J , то число амперъ-витковъ $A = J \cdot N$. Имѣемъ:

$$A = F \cdot \left(\frac{1}{q \cdot M} + \frac{\delta}{q \cdot M_0} \right) = F \cdot \frac{1}{q \cdot M_0} \cdot \left(\frac{1}{\mu} + \delta \right) = F \cdot \frac{1}{q \cdot M} \cdot (1 + \mu \cdot \delta)$$

или

$$B = \frac{M \cdot N \cdot J}{1 + \mu \cdot \delta}$$

Напримѣръ, при силовомъ потокѣ $B = 12000 \cdot 10^{-8}$ проницаемость $\mu = 1400$. Если желаемъ получить такую силу поля, то необходимая для этого сила тока J вычисляется по формулѣ

$$J = \frac{1 + 1400 \cdot \delta}{N \cdot M} \cdot B.$$

Такимъ образомъ, на 1 м. воздуха требуется столько же амперъ-витковъ, сколько на 1,4 м. желѣза.

КАТУШКА СЪ ЖЕЛѢЗНЫМЪ СЕРДЕЧНИКОМЪ.

330. Теоретически столь изящный и безупречный методъ измѣренія проницаемости ферромагнитныхъ веществъ при помощи кольцевого соленоида на практикѣ употребляется лишь въ исключительныхъ случаяхъ. Для быстрого и точнаго измѣренія необходимо помѣстить изслѣдуемое вещество въ готовой намагничивающей катушкѣ, составляющей часть готоваго аппарата. Это возможно лишь при условіи, если катушка имѣетъ цилиндрическую форму, а изслѣдуемое вещество имѣетъ форму стержня.

При измѣненіи силы тока, проходящаго по катушкѣ съ желѣзнымъ сердечникомъ, форма магнитныхъ силовыхъ линій, тождественная съ формой силовыхъ линій въ случаѣ соленоида съ токомъ (рис. 138), измѣняется очень мало. Вслѣдствіе этого магнитное сопротивленіе внѣшняго поля почти не измѣняется. Обозначимъ его черезъ R_0 ; число амперъ-витковъ катушки $A = N \cdot J$ связано съ магнитнымъ силовымъ потокомъ F соотношеніемъ

$$A = N \cdot J = F \left(R_0 + \frac{l}{q \cdot M} \right);$$

здѣсь l —длина желѣзнаго сердечника, q —его сѣченіе, M —его абсолютная проницаемость. Если мы можемъ какимъ-либо способомъ вычислить R_0 , то для опредѣленія проницаемости M (а также, слѣдовательно, и μ) остается лишь извѣстнымъ способомъ измѣрить A и F .

Внѣшнія силовыя линіи совершенно не измѣняются только въ томъ случаѣ, если желѣзный сердечникъ имѣетъ форму эллипсоида. Въ этомъ случаѣ, сверхъ того, внутреннее поле будетъ дѣйствительно вполнѣ однороднымъ, если только эллипсоидъ находится весь внутри катушки. Величину R_0 можно точно вычислить по простымъ формуламъ, а съ помощью величины M можно также опредѣлить и магнитное сопротивленіе эллипсоида. Если мы желаемъ при помощи катушки и сердечника точно измѣрить M , то нужно предварительно изготовить изъ изслѣдуемаго матеріала удлиненный эллипсоидъ вращения.

„ B - H -кривая“ изслѣдуемаго ферромагнитнаго вещества можетъ быть получена слѣдующимъ графическимъ способомъ. Пусть H' будетъ число амперъ-витковъ самой катушки, приходящееся на сантиметръ, т. е. $H' = N \cdot J : l$, гдѣ l —длина катушки. Сначала мы

представляемъ величину B (измѣряемую суммою ударовъ напряжений) въ видѣ кривой, какъ функцію величины H' . Затѣмъ мы черезъ нулевую точку проводимъ косо вверхъ линію, разстояніе которой отъ оси ординатъ вездѣ указываетъ, какую величину нужно вычесть изъ H' при соответственномъ значеніи B , чтобы получить силу поля H внутри желѣзнаго стержня; въ нашемъ случаѣ это будетъ величина $F R_0 : l$. Эта такъ называемая „линія сдвига“ представляетъ собою прямую, если магнитное сопротивленіе внѣшняго поля R_0 постоянно. Если затѣмъ каждую точку $B-H'$ -кривой передвинуть на отрѣзокъ, указываемый линіей сдвига для соответствующаго значенія B , то сдвинутая такимъ образомъ кривая и будетъ искомая $B-H$ -кривая изслѣдуемаго вещества. Это графическое построеніе представлено на рисункахъ 231 и 232.

МЕТОДЪ ЗАМКНУТАГО КОЛЬЦА (МЕТОДЪ ГОПКИНСОНА).

331. Вліяніе внѣшняго поля на измѣренія можно исключить весьма простымъ способомъ: для этого достаточно сдѣлать число



Рис. 224. Магнитное „ядро“ Гопкинсона (схематически).

его амперъ-витковъ очень малымъ. Съ этой цѣлью изслѣдуемый стержень вставляется въ толстое кольцо („ядро“) изъ мягкаго кованаго желѣза такимъ образомъ, чтобы оба его конца были соединены между собою желѣзомъ и магнитно замкнуты „на-короткую“. Самый стержень имѣетъ точную цилиндрическую форму и определенную толщину (нѣсколько миллиметровъ) и какъ разъ входитъ въ ядро. Концы стержня прочно прижимаются винтами къ желѣзу ярама такъ, чтобы не оставалось промежуточнаго воздушнаго пространства. Намагничивающая катушка и маленькая катушка, служащая

для измѣренія ударовъ напряженій, прочно соединены съ ярмомъ; въ нихъ вставляется стержень, когда на этотъ послѣдній надѣваютъ ярмо. Такъ какъ поперечное сѣченіе ярма весьма велико, то плотность магнитнаго силового потока (удѣльная индукція) въ ярмѣ B_j гораздо меньше, чѣмъ удѣльная индукція въ стержнѣ B . Если сѣченіе ярма въ 200 разъ больше сѣченія стержня, то $B_j = 0,005 B$. Далѣе, такъ какъ проницаемость ярма весьма велика, то ясно, что приходящееся на ярмо число амперъ-витковъ не превосходитъ 1% общаго числа. Такимъ образомъ, безъ большой погрѣшности можно число амперъ-витковъ намагничивающей катушки считать равнымъ числу амперъ-витковъ строго однороднаго поля въ изслѣдуемомъ тонкомъ стержнѣ. Если же требуется очень большая точность, то слѣдуетъ опредѣлить „линію сдвига“ аппарата, которая, конечно, не представляетъ собою прямой, такъ какъ внѣшнее поле проходитъ въ желѣзо.

Методъ замкнутаго кольца (рис. 224) изобрѣтенъ Гопкинсомъ (Hopkinson), который впервые примѣнилъ его къ изслѣдованію ферромагнитныхъ веществъ.

ИЗМѢРЕНІЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ СИЛОВЫМИ (ПОНДЕРОМОТОРНЫМИ) ДѢЙСТВІЯМИ.

332. Во всѣхъ описанныхъ до сихъ поръ методахъ измѣреніе силового потока имѣетъ тотъ недостатокъ, что искомая величина получается лишь путемъ суммированія многихъ ударовъ напряженій, измѣряемыхъ при отдѣльныхъ внезапныхъ измѣненіяхъ тока. Конечно, несравненно лучше опредѣлять искомую величину сразу, при помощи одного только измѣренія. Чтобы измѣрить въ одинъ пріемъ магнитную индукцію, удобнѣе всего пользоваться механическими силовыми дѣйствіями поля.

Если ферромагнитный стержень не замкнуть на-короткую ярмомъ, то можно просто измѣрить поле на большомъ разстояніи отъ стержня и отсюда вычислить его магнитный моментъ (§ 321). Силовой потокъ внутри стержня въ этомъ случаѣ въ точности равенъ силовому потоку въ пустомъ соленоидѣ, имѣющемъ форму стержня и его магнитный моментъ, и поэтому можетъ быть сейчасъ же вычисленъ. Если желательно произвести такимъ методомъ точное измѣреніе, то стержню слѣдуетъ придать форму удлиненаго эллипсоида вращенія (ср. § 330).

333. Обыкновенно при измѣреніи поля механическими силами тоже предпочитаютъ замкнуть концы стержня на-короткую при по-

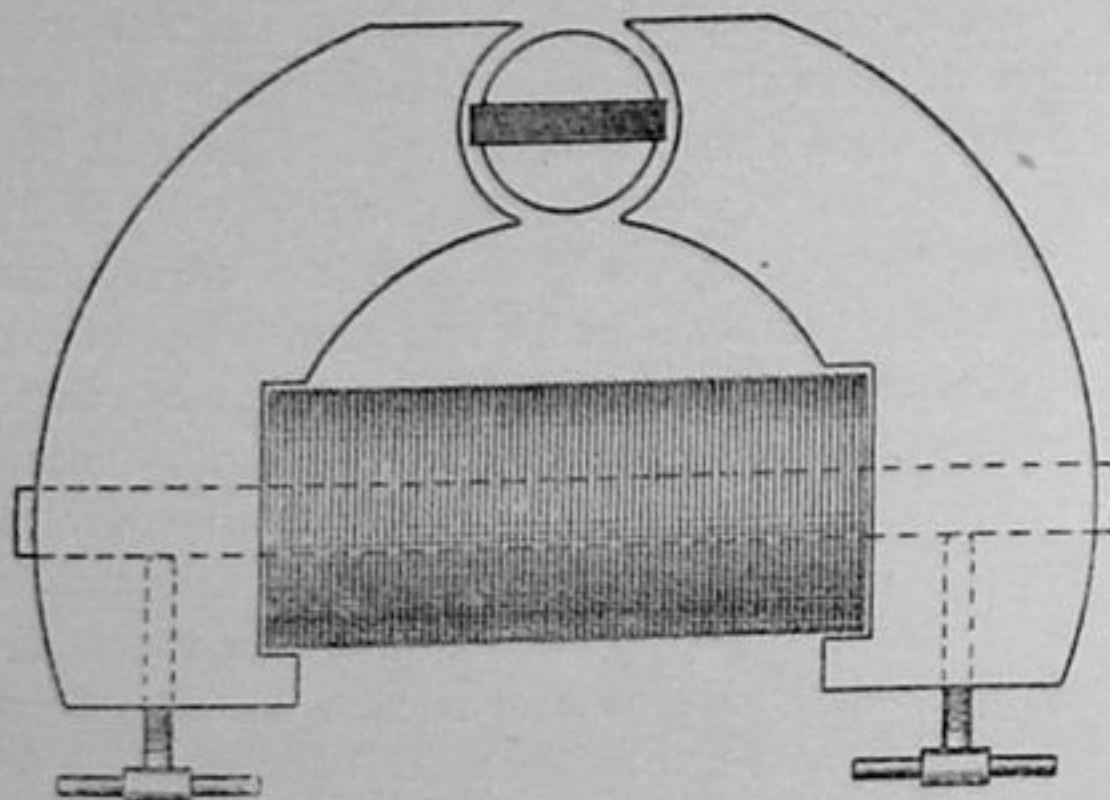


Рис. 225. Аппаратъ Кёпселя (схематически).

моши магнитнаго яра, такъ какъ при этомъ можно пользоваться цилиндрическими стержнями, которые легче вытаскиваются съ точностью. Въ ярмѣ должна находиться гдѣ-нибудь узкая воздушная щель,

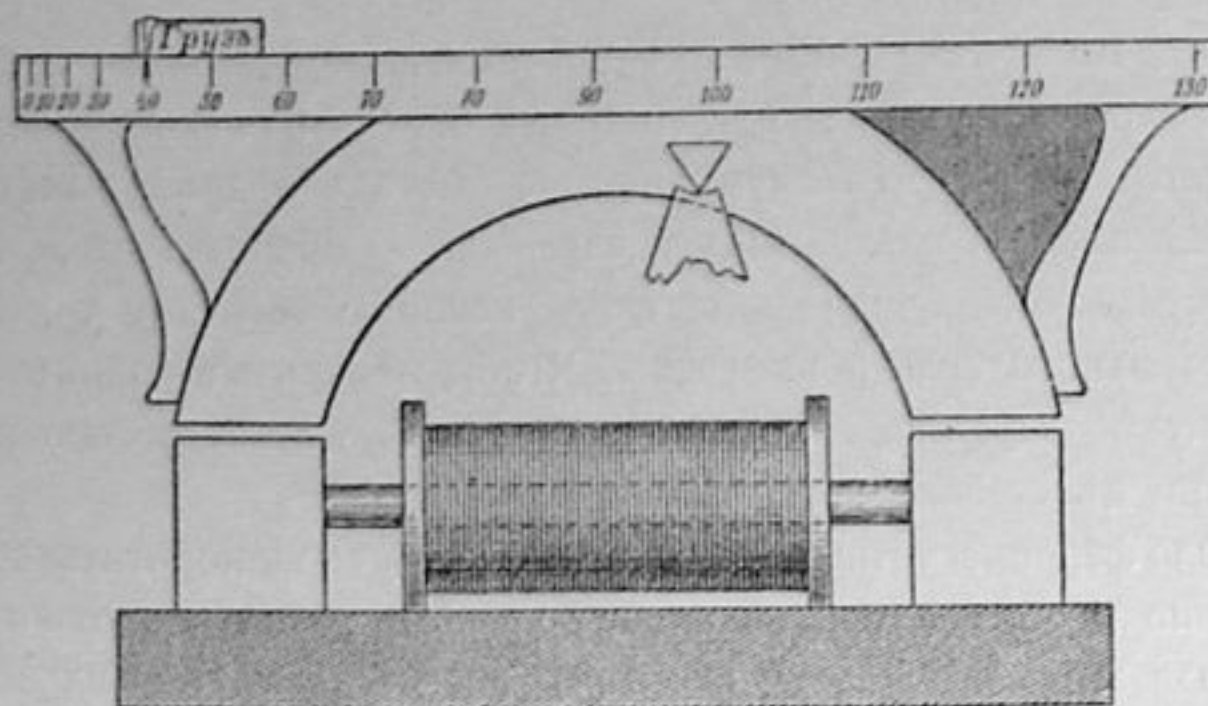


Рис. 226. Магнитные вѣсы Дюбуа (схематически).

въ которой измѣряется силовое дѣйствіе поля. Очень удобенъ аппаратъ Кёпселя (Köpsel) съ вращающейся катушкой; здѣсь магнитный индукторъ замѣненъ намагничивающей катушкой съ изслѣдуемымъ стержнемъ, а полюсные башмаки — сильнымъ магнитнымъ ярмомъ

(рис. 225). Электрический токъ во вращающейся катушкѣ регулируется при помощи реостата до известной предписанной силы, отсчитываемой по включенному въ цѣль точному амперметру. Сила, съ которой магнитное поле ярма дѣйствуетъ на катушку, а, слѣдовательно, и отклоненіе стрѣлки прямо пропорціональны силовому потоку B_j въ ярмѣ, а также, слѣдовательно, и силовому потоку B въ стержнѣ. Поэтому шкалу инструмента можно градуировать такимъ образомъ, чтобы непосредственно отсчитывать на ней значеніе B . При вычисленіи намагничивающей силы H слѣдуетъ принять во вниманіе, что цилиндрическая щель, въ которой движется вращающаяся катушка, обладаетъ магнитнымъ сопротивленіемъ, которымъ нельзя совершенно пренебречь и которое должно быть исключено посредствомъ небольшой поправки на число витковъ намагничивающей катушки.

Другой инструментъ съ ярмомъ и со щелями для измѣреній силы поля называется магнитными вѣсами Дюбуа (Dubois) (рис. 226). Посредствомъ передвижного груза можно опредѣлить, съ какой силой взаимно притягиваются двѣ полюсныя поверхности, ограничивающія щель. Посредствомъ формулы, выведенной въ § 319, по величинѣ этой силы можно опредѣлить величину B .

ГИСТЕРЕЗИСЪ.

334. Если силу намагничивающаго тока сперва увеличить настолько, чтобы желѣзный сердечникъ сильно намагнитился, а затѣмъ постепенно уменьшать силу тока, то для каждаго числа амперъ-витковъ убывающаго въ силѣ тока получается бѣльшая магнитная индукція, нежели для тока возрастающаго. Это явленіе представляетъ собою не что иное, какъ уже упомянутое въ § 225 остаточное намагниченіе. Оно относится къ числу тѣхъ свойствъ матеріи, которыя носятъ названіе послѣдствій или гистерезиса, и потому обычно называется теперь магнитнымъ гистерезисомъ желѣза. Если уменьшать силу тока до тѣхъ поръ, пока число амперъ-витковъ въ желѣзѣ не станетъ равнымъ нулю, то магнитная индукція при этомъ сохранить весьма замѣтное значеніе, какъ показываетъ B - H -кривая желѣзной проволоки на рис. 227. Только при переѣнѣ знака числа амперъ-витковъ значеніе B становится, наконецъ, равнымъ нулю. Будемъ увеличивать далѣе намагничивающій токъ въ отрицательномъ направленіи до отрицательнаго наибольш-

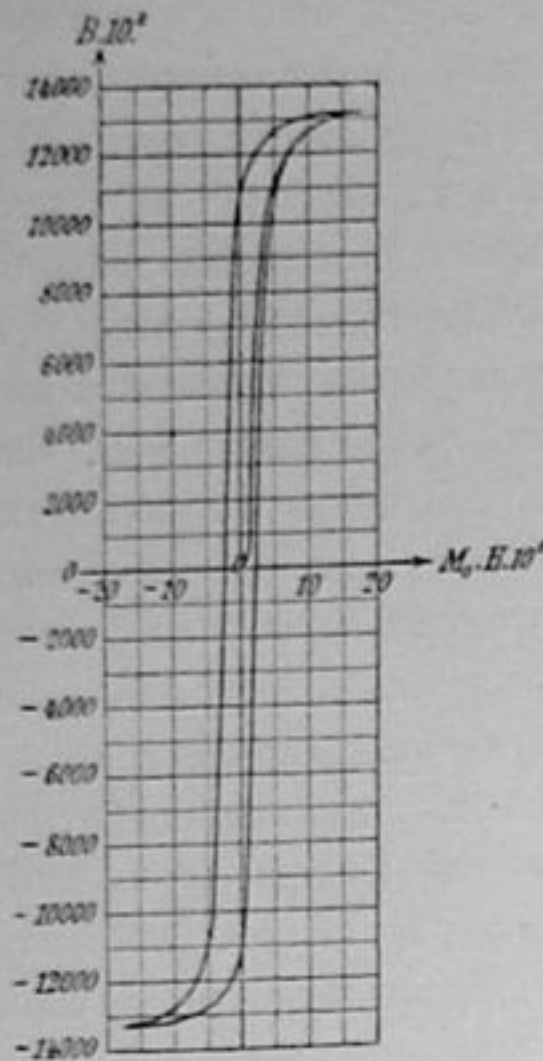


Рис. 227. Гистерезисъ ^{мягкаго} желѣза.

шаго значенія, равнаго достигнутому раньше наибольшему положительному значенію; затѣмъ снова вернемся къ нулю, и заставимъ токъ возрастать въ положительномъ направленіи до максимальнаго значенія; потомъ опять возвратимся назадъ и будемъ повторять этотъ „циклическій процессъ намагниченія“ много разъ. Въ результатъ получается $B-H$ -кривая въ видѣ правильной петли, изображенной на рис. 227. При повтореніи цикловъ эта петля кривой гистерезиса остается неизмѣнной. Для твердаго желѣза и еще болѣе для стали петли гистерезиса гораздо шире, чѣмъ для мягкаго желѣза, какъ это видно изъ сравненія рис. 228 съ рис. 227.

Всѣ ферромагнитныя вещества обладаютъ въ большей или меньшей степени свойствомъ магнитнаго гистерезиса.

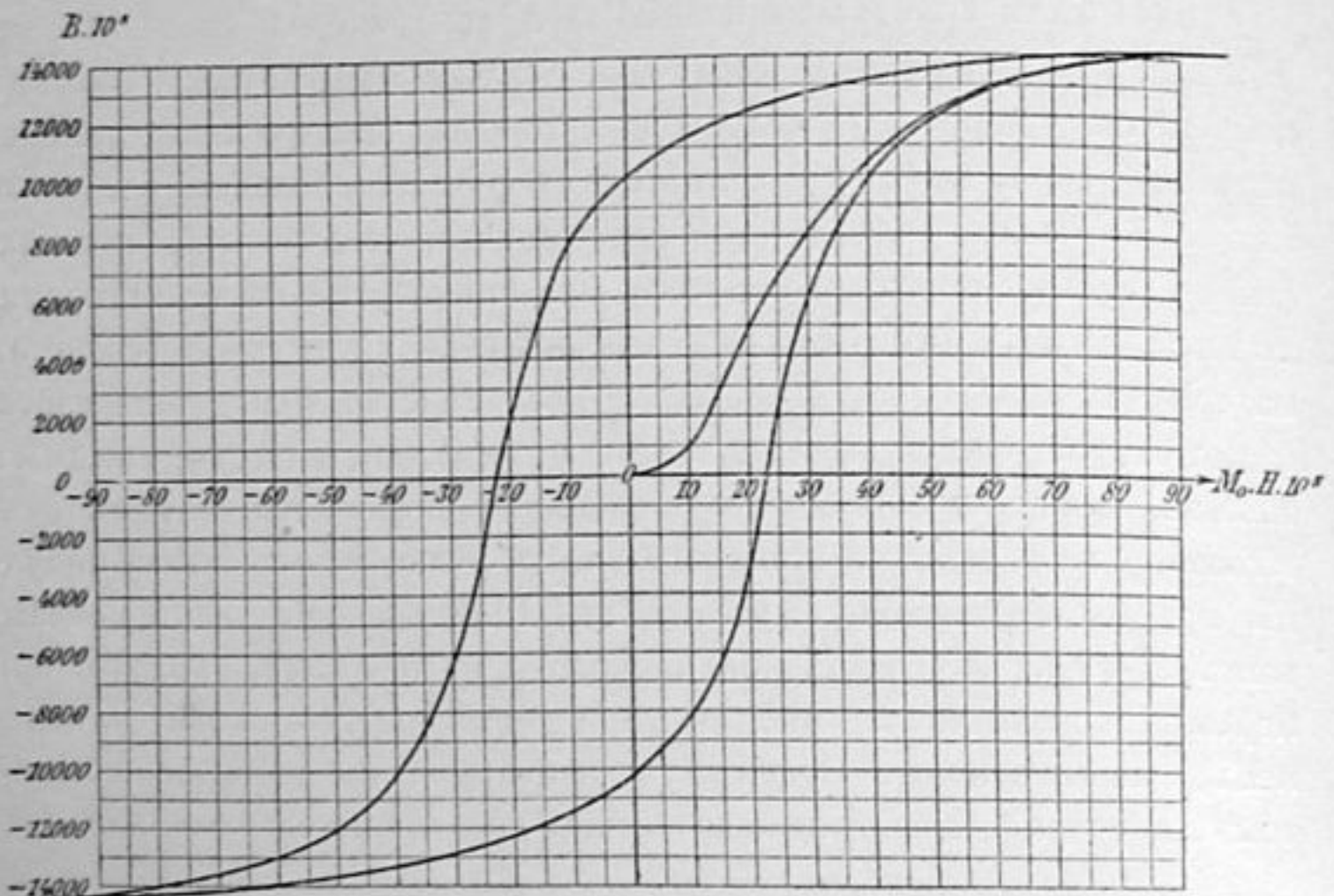


Рис. 228. Гистерезисъ стали.

Если механически встряхивать намагничиваемый стержень, то гистерезисъ уменьшается и можетъ даже почти исчезнуть. Въсто петли тогда получается одна кривая посрединѣ между восходящей и нисходящей вѣтвями петли. Остаточное намагниченіе желѣзнаго стержня исчезаетъ отъ сильныхъ ударовъ. Намагниченіе, возбуждаемое въ такомъ стержнѣ слабымъ полемъ, гораздо сильнѣе, если стержень при этомъ ударяютъ, чѣмъ если онъ находится въ покоѣ. Этимъ объясняется упомянутое въ § 231 намагниченіе стальныхъ инструментовъ земнымъ полемъ.

Подобно механическому встряхиванію дѣйствуетъ переменное магнитное поле, вызывающее колебательное движеніе молекулярныхъ магнитовъ. Можно размагнитить магнитъ, подвергая его дѣйствию постепенно ослабѣвающего переменнаго поля. Этимъ способомъ часовые мастера исправляютъ часы въ тѣхъ случаяхъ, когда пружина подъ дѣйствіемъ сильнаго магнитнаго поля становится магнитной, и часы потому идутъ неправильно.

ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ.

335. Остаточнымъ магнетизмомъ, или гистерезисомъ, объясняется существованіе постоянныхъ магнитовъ. Внутри постояннаго магнитнаго стержня, не окруженнаго катушкой съ токомъ, поле, измеренное въ амперъ-виткахъ, отлично отъ нуля. Если мы будемъ считать

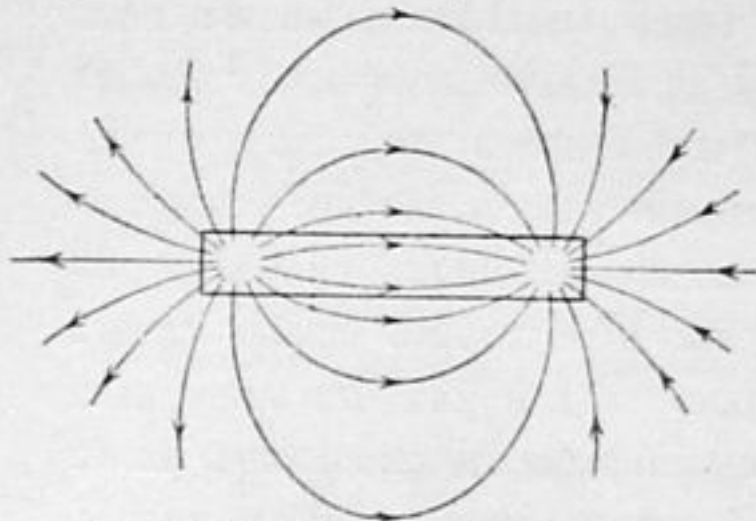


Рис. 229. Силовыя линіи постояннаго магнита

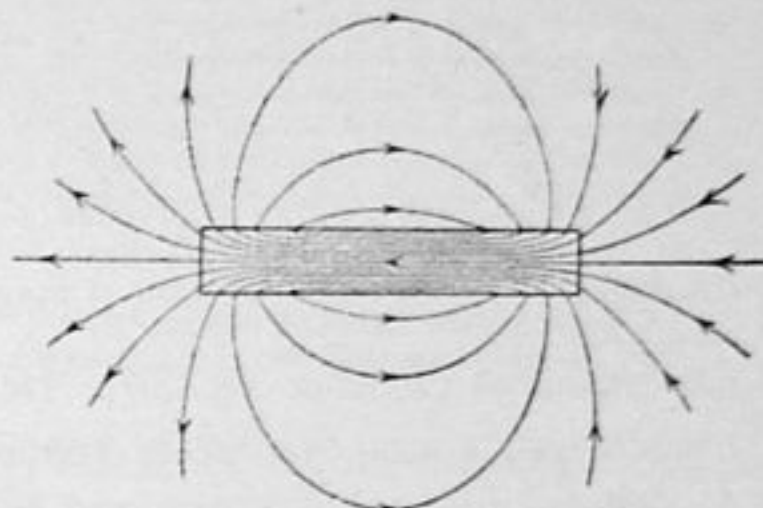


Рис. 230. Линіи силового потока постояннаго магнита.

амперъ-витки внѣшняго поля положительными, то внутри стержня будетъ находиться поле отрицательныхъ амперъ-витковъ: въ самомъ дѣлѣ, сумма всѣхъ амперъ-витковъ вдоль замкнутой кривой должна равняться нулю, потому что намагничивающій токъ равенъ нулю. Чтобы наблюдать и измерить поле внутри стержня, направленное про-

тивоположно намагниченію, нужно сдѣлать въ стержнѣ продольный каналъ, какъ указано въ § 245. Но удобнѣе вычислить поле теоретическимъ путемъ. Результатомъ такого теоретическаго вычисленія являются силовыя линіи, представленныя на рис. 229; онѣ вездѣ показываютъ направленіе осей соленоидовъ, эквивалентныхъ полю магнита.

Линіи магнитнаго силового потока идутъ внутри стержня совершенно иначе. Векторъ B , согласно основному закону, образуетъ систему замкнутыхъ линій. Силовой потокъ постояннаго магнита представлечъ на рис. 230.

Внутри постояннаго магнита векторы, представляющіе силу поля H и индукцію B , имѣютъ противоположныя направленія.

Такимъ образомъ, величину остаточнаго силового потока представляетъ не та точка кривой гистерезиса, гдѣ $H = 0$, но нѣкоторая точка въ области отрицательныхъ значеній H . Положеніе этой точки зависитъ отъ числа амперъ-витковъ внѣшняго поля и отъ длины магнитнаго стержня. Чтобы найти эту точку, нужно вычислить магнитное сопротивление внѣшнихъ силовыхъ линій и построить линію сдвига

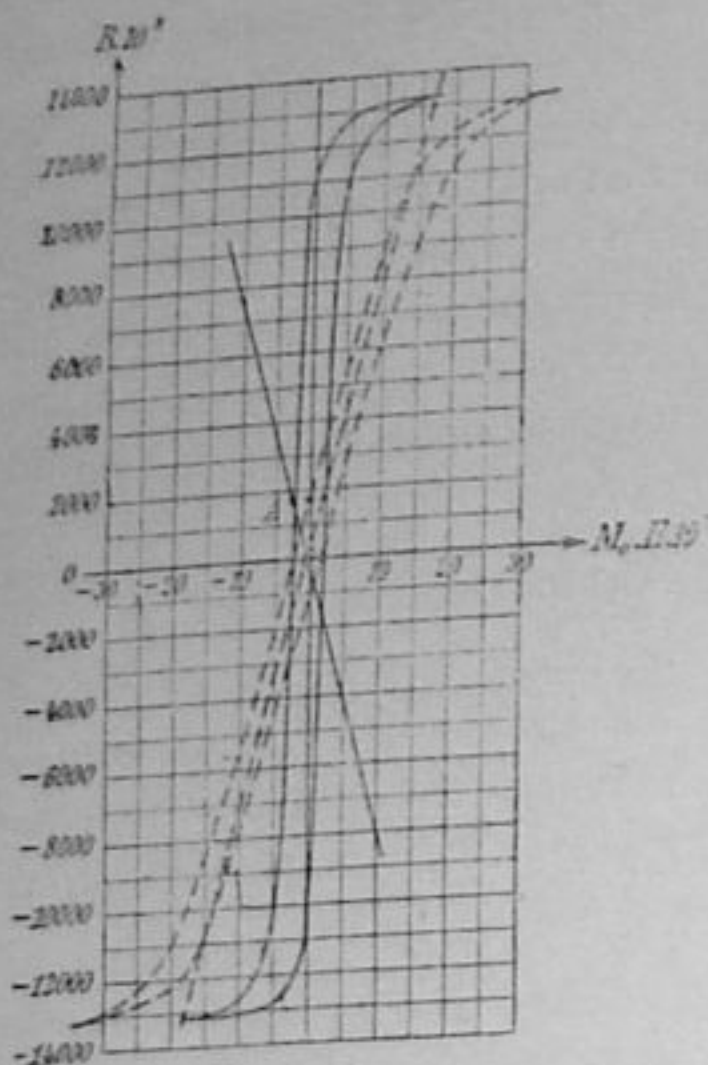


Рис. 231. Сдвигъ петли гистерезиса стержня изъ мягкаго желѣза. Отношеніе толщины къ длинѣ 1 : 50. A даетъ остаточный силовой потокъ B_0 .

для даннаго стержня (§ 330). На рис. 231 и 232 эта линія дана для случая, когда отношеніе толщины стержня къ его длинѣ равно 1 : 50, на примѣръ, для стержня въ 4 мм. толщины и 20 см. длины. Если затѣмъ при помощи линіи сдвига $B-H$ -кривой построить $B-H'$ -кривую вещества, гдѣ H' — число амперъ-витковъ въ окружающей стержень намагничивающей катушкѣ, то значеніе B , соответствующее $H' = 0$, и будетъ остаточной индукціей стержня B_0 . Если линію сдвига провести въ сторону отрицательныхъ значеній H (OA на рис. 231 и 232), то эта линія пересѣчетъ $B-H$ -кривую вещества какъ разъ въ точкѣ B_0 .

Какъ видимъ, линия сдвига и у тонкихъ стержней составляетъ весьма значительный уголъ съ осью B . Отсюда слѣдуетъ, что величина остаточнаго магнетизма опредѣляется не высотой, на которой кривая гистерезиса пересѣкаетъ ось B , но, прежде всего, шириною петли кривой гистерезиса.

Половину ширины петли кривой гистерезиса, измеренную въ амперъ-виткахъ, можно разсматривать, какъ мѣру коэрцитивной силы, такъ какъ она равняется числу амперъ-витковъ на санти-

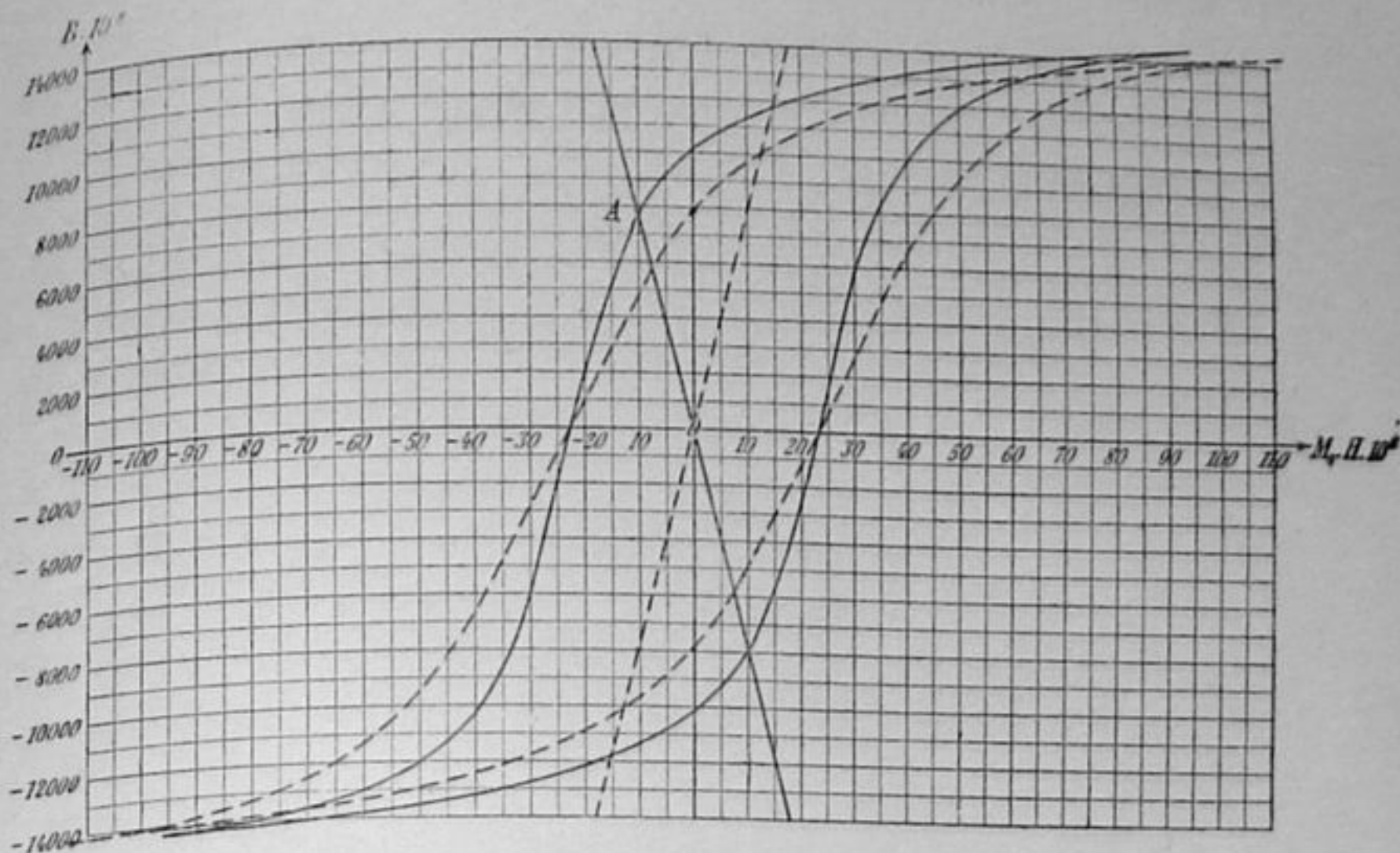


Рис. 232. Сдвигъ петли гистерезиса стального стержня.

Отношеніе толщины къ длинѣ 1 : 50. А даетъ остаточный силовой потокъ B_c .

метръ, необходимому для уничтоженія остаточнаго магнетизма. Сталь гораздо болѣе, нежели мягкое желѣзо, пригодна для постоянныхъ магнитовъ, такъ какъ ея петля гистерезиса гораздо шире.

Совершенно иначе обстоитъ дѣло, когда нѣтъ обширнаго поля въ воздухѣ и кривая сдвига почти совпадаетъ съ осью B . Въ замкнутомъ круговомъ кольцѣ остаточная индукція мягкаго желѣза больше, чѣмъ у стали, такъ какъ кривая гистерезиса мягкаго желѣза поднимается очень высоко. Но даже узкая воздушная щель сильно понижаетъ остаточный магнетизмъ.

Какъ показываетъ рис. 229, лінії силъ въ постоянныхъ магнитахъ сходны съ лініями электростатическаго поля: онѣ имѣютъ начало и конецъ. По аналогіи съ обозначеніями, принятыми въ ученіи объ электричествѣ, мѣста, гдѣ лінії начинаются и гдѣ онѣ кончаются, называются соотвѣтственно положительнымъ и отрицательнымъ свободнымъ магнетизмомъ. Этому соотвѣтствуютъ свободные электрическіе заряды у двухъ концовъ турмалиноваго стержня (§ 90). Дѣйствительныхъ же магнитныхъ зарядовъ, которые могли бы переноситься черезъ проводники, не существуетъ, какъ мы уже неоднократно указывали выше.

ЭНЕРГІЯ НАМАГНИЧЕНІЯ.

336. Обозначимъ силу поля въ амперь-виткахъ черезъ H и индукцію въ вольтъ-секундахъ черезъ B . Чтобы увеличить индукцію на малую величину ΔB , нужно, согласно формулѣ, выведенной въ § 318, сообщить желѣзу черезъ посредство ээира коли-

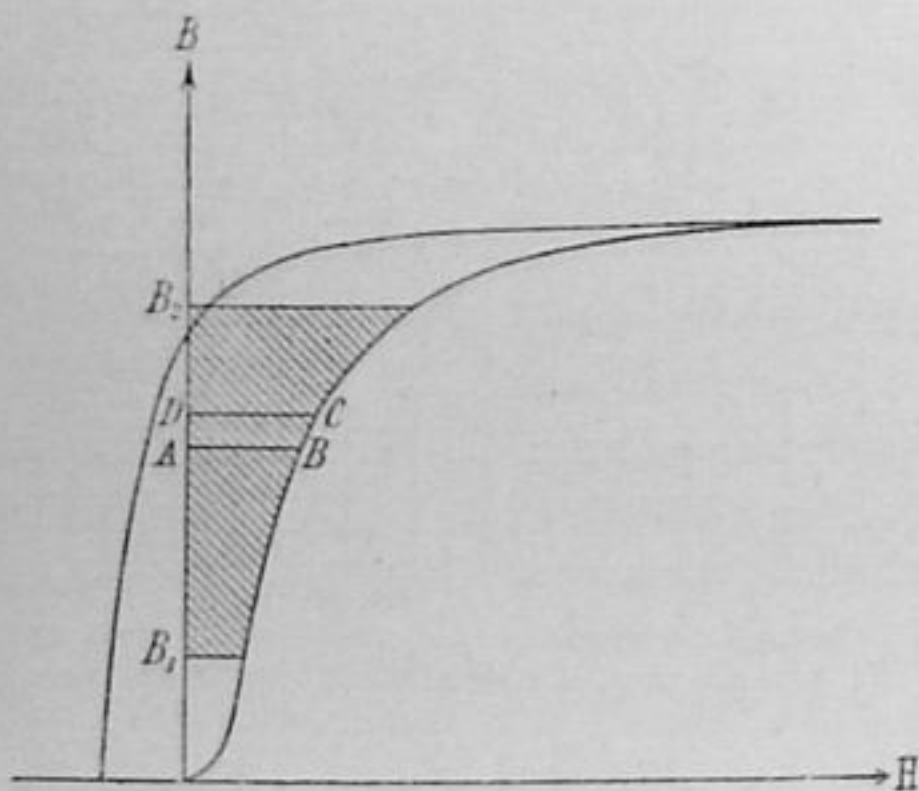


Рис. 233. Энергія намагніченія желѣза.

чество энергіи, равное $H \cdot \Delta B$ джулямъ на кубическій сантиметръ. Отсюда легко вычислить энергію, поглощаемую электромагнитомъ. На рис. 233, представляющемъ H - B -кривую, величина $H \cdot \Delta B$ равна четырехугольнику $ABCD$, образуемому отрезкомъ ΔB оси ординатъ, двумя горизонтальными прямыми, проведенными изъ его концовъ, и отрезкомъ H - B -кривой, соотвѣтствующимъ приращенію ΔB . Отсюда легко вывести слѣдующее:

Энергія, поглощаемая каждымъ кубическимъ сантиметромъ желѣзнаго стержня, когда магнитная индукція возрастаетъ въ немъ отъ значенія B_1 до B_2 , графически представляется площадью, ограниченной осью B , двумя прямыми, параллельными оси H и проходящими черезъ точки B_1 и B_2 , и соответствующимъ отрѣзкомъ $B-H$ -кривой.

При убываніи намагничивающаго тока магнитъ обратно отдаетъ энергію; расчетъ при этомъ точно такой же, какъ и въ случаѣ поглощенія энергіи. Но такъ какъ при убываніи поля $H-B$ -кривая, вслѣдствіе гистерезиса, лежитъ повсюду выше, нежели при возрастаніи поля, то при возвращеніи къ начальному значенію намагничивающаго тока отдаваемая магнитомъ энергія меньше того количества, которое раньше было доставлено магниту. Если мы выполнимъ полный магнитный циклъ, то повсюду будемъ имѣть эту разницу: магнитъ поглощаетъ энергію, которой онъ не отдаетъ обратно.

При каждомъ магнитномъ циклѣ часть доставляемой энергіи поглощается желѣзомъ, и эта потеря энергіи составляетъ на 1 кубической сантиметръ количество, равное площади, ограниченной петлею гистерезиса.

Такимъ образомъ магнитный гистерезисъ, какъ и всякое послѣдствіе, сопровождается потерей энергіи. Конечно, въ этомъ случаѣ, какъ и всегда, затраченная энергія проявляется въ желѣзѣ въ формѣ теплоты.

Въ виду потери энергіи черезъ гистерезисъ, въ электромагнитныхъ машинахъ части желѣзныхъ сердечниковъ, подвергаемая переменному намагніченію, изготовляются изъ такихъ сортовъ мягкаго желѣза, которые обладаютъ наиболѣе узкой петлей гистерезиса.

ФЕРРОМАГНИТНЫЯ ТѢЛА ВЪ ОЧЕНЬ СИЛЬНЫХЪ МАГНИТНЫХЪ ПОЛЯХЪ.

337. Вопросъ объ измѣненіи величины B при весьма большихъ значеніяхъ H разрѣшенъ Юингомъ при помощи весьма интересныхъ опытовъ. Онъ изготовлялъ изъ изслѣдуемаго матеріала тѣло, имѣвшее форму катушки для нитокъ. Какъ показываетъ рис. 234, изслѣдуемое тѣло состояло изъ двухъ конусовъ съ угломъ при вершинѣ, нѣсколько большимъ 120° . Эти конусы соединены между собою при помощи тонкаго цилиндрическаго „перешейка“. Основанія конусовъ точно пригонялись къ полюснымъ поверхностямъ

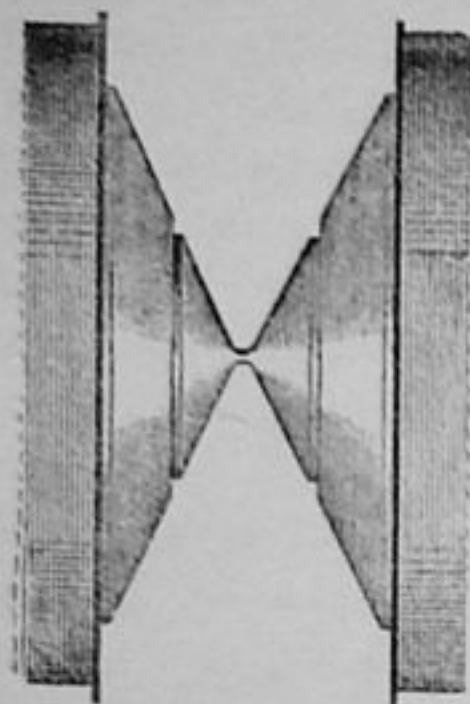


Рис. 234. Магнитный перешеекъ.

сильнаго электромагнита. Перешеекъ нужно представлять себѣ окруженнымъ индукціонной катушкой, помощью которой измѣряется величина B . Для этой цѣли либо изслѣдуемое тѣло внезапно выводилось изъ поля, либо же основанія конусовъ дѣлались въ видѣ цилиндрическихъ отрѣзковъ, которые плотно входили въ полый цилиндръ, образуемый полюсными башмаками, и для измѣренія удара напряженія тѣло поворачивалось на 180° . Большой электромагнитъ легко было возбудить до такой силы, чтобы поле между полюсными башмаками достигало величины $H = 10000 \frac{\text{амп.-витк.}}{\text{см.}}$ ($M_0 \cdot H =$

$12500 \cdot 10^{-8}$). При такой установкѣ сила поля H въ перешейкѣ почти такая же, какъ и въ непосредственно окружающемъ его

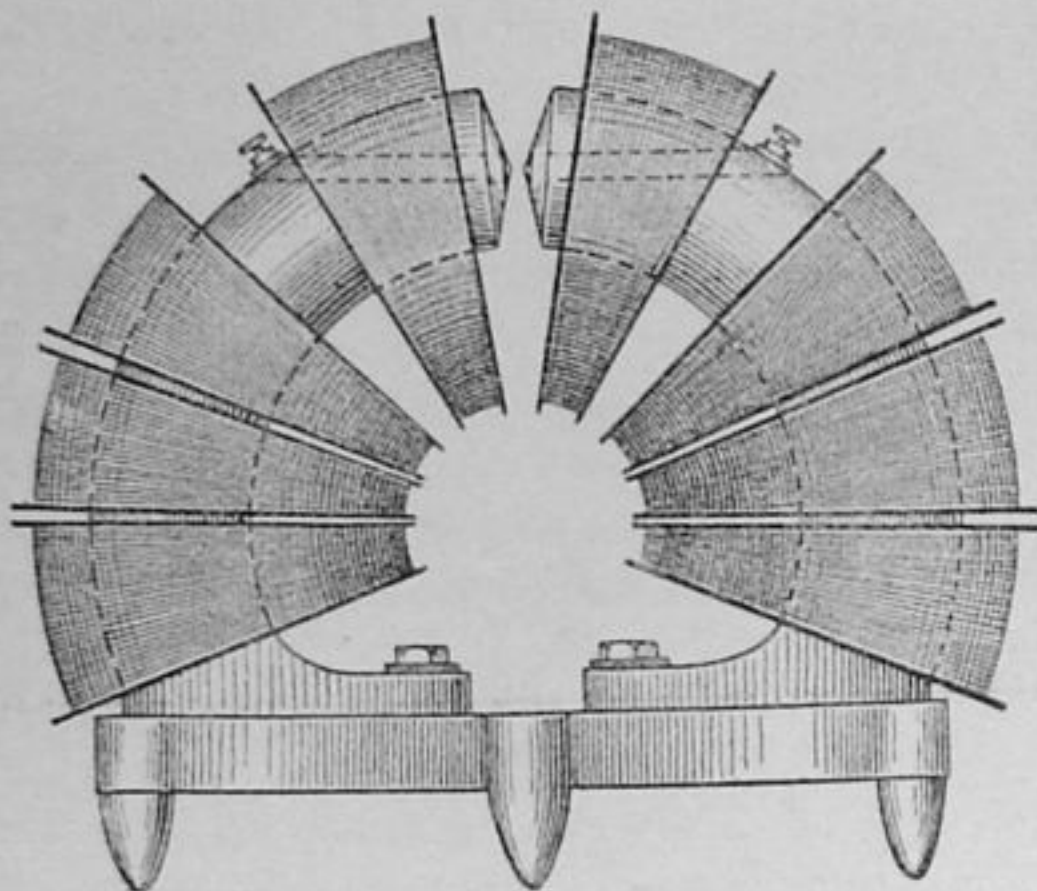


Рис. 235. Полукольцевой электромагнитъ Дюбуа.

пространствѣ. Такимъ образомъ, сконцентрировавъ при помощи конусовъ силовыя линіи съ широкой полюсной поверхности въ узкій перешеекъ, можно получить такое число амперъ-витковъ на сантиметръ, какого нельзя было бы достигнуть непосредственно при помощи намагничивающей катушки, такъ какъ при очень большой плотности

тока проволоки раскалились бы до-бѣла. Чтобы найти силу поля H въ перешейкѣ, измѣряютъ поле непосредственно вблизи него при помощи индукціонной катушки. Для этой цѣли перешеекъ снабжаютъ, кромѣ плотно прилегающей къ нему катушки, еще второю катушкою, отдѣленною отъ перешейка слоемъ воздуха. Разность между числами силовыхъ линий въ этихъ двухъ катушкахъ даетъ число силовыхъ линий въ этомъ воздушномъ промежуткѣ. Если индукція въ воздухѣ равна B , то $H = B : M_0$; это и есть значеніе H въ перешейкѣ.

Помощью „метода перешейка“ Юингъ нашелъ слѣдующій важный результатъ:

При весьма большихъ числахъ амперъ-витковъ (для мягкаго желѣза приблизительно отъ $H = 2000 \frac{\text{амп.-витк.}}{\text{см.}}$) намагниченіе $M = B - M_0 H$ въ ферромагнитныхъ веществахъ сохраняетъ постоянное значеніе.

Состояніе, соотвѣтствующее максимальному намагниченію, которое достигается при высокихъ силахъ поля и остается затѣмъ постояннымъ, называется „состояніемъ насыщенія“.

Когда намагниченіе достигло насыщающей величины, поле далѣе налагается совершенно такъ же, какъ и въ чистомъ эфирѣ, гдѣ $B = M_0 H$.

Намагниченіе, соотвѣтствующее состоянію насыщенія, для мягкаго желѣза равняется приблизительно $21000 \cdot 10^{-8} \frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{кв. см.}}$. Для стали и другихъ сортовъ желѣза получаются весьма сходныя между собою величины. Главное различіе между отдѣльными сортами желѣза заключается въ томъ, что нѣкоторые сорта съ возрастаніемъ числа амперъ-витковъ быстрѣе достигаютъ состоянія насыщенія, другіе же сорта — медленнѣе. Самыя же величины намагниченія, соотвѣтствующія состоянію насыщенія, различаются между собою лишь незначительно.

ПОЛУКОЛЬЦЕВОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТЪ.

338. Методъ перешейка позволяетъ получать магнитныя поля чрезвычайно высокой силы. Если перешеекъ перерѣзать и образовать небольшую воздушную щель, то въ ней можно получать силы поля, значительно превосходящія тѣ, которыя получаютъ при обычныхъ

насыщенных полюсных башмакахъ. На принципъ перешейка основано устройство такъ называемаго полукольцевого электромагнита Дюбуа (рис. 235); съ помощью этого инструмента можно дойти почти до $B = 40\,000 \cdot 10^{-8}$. Эти сильныя поля сыграли важную роль во многихъ новѣйшихъ физическихъ изслѣдованіяхъ.

ДРУГІЯ ФЕРРОМАГНИТНЫЯ ВЕЩЕСТВА.

339. Кромѣ желѣза, ферромагнитными являются также два металла, близкіе къ желѣзу по химическимъ свойствамъ, — никкель (рис. 236) и кобальтъ (рис. 237). Они оба даютъ характерную $B-H$ -кривую, а при циклическихъ намагниченіяхъ — петлю гистерезиса. Однако намагниченіе этихъ металловъ всегда слабѣе намагниченія желѣза. При весьма высокихъ силахъ поля ихъ намагниченіе M достигаетъ насыщающаго значенія, лежащаго значительно ниже, чѣмъ у желѣза. Именно, оно равно:

для желѣза	$21\,000 \cdot 10^{-8}$
„ кобальта	$15\,000 \cdot 10^{-8}$
„ никелля	$6\,700 \cdot 10^{-8}$.

Ферромагнитны также нѣкоторыя желѣзныя руды, обладающія металлическимъ блескомъ. Къ ихъ числу, конечно, относится магнетитъ, на которомъ было впервые открыто постоянное намагниченіе.

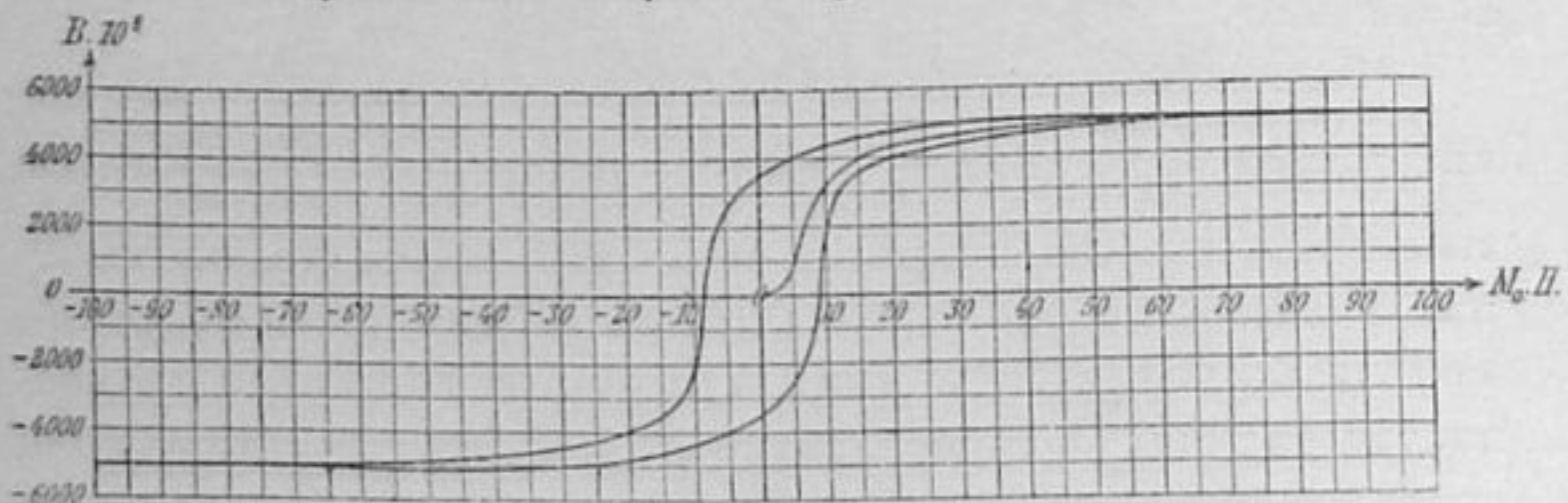


Рис. 236. Кривая намагниченія никкеля.

Эти желѣзныя руды часто хорошо кристаллизуются, и тогда ихъ магнитныя свойства зависятъ, какъ оказывается, отъ кристаллографической ориентировки. По этому вопросу весьма интересныя наблюденія были сдѣланы П. Вейссомъ (P. Weiss).

Наконецъ, въ высшей степени замѣчательнъ фактъ, открытый Гейслеромъ (Heusler): сплавы нѣсколькихъ металловъ, изъ которыхъ

каждый въ отдѣльности не магнитенъ, могутъ быть ферромагнитными. Сюда относятся сплавы немагнитнаго металла марганца; по Гейслеру,

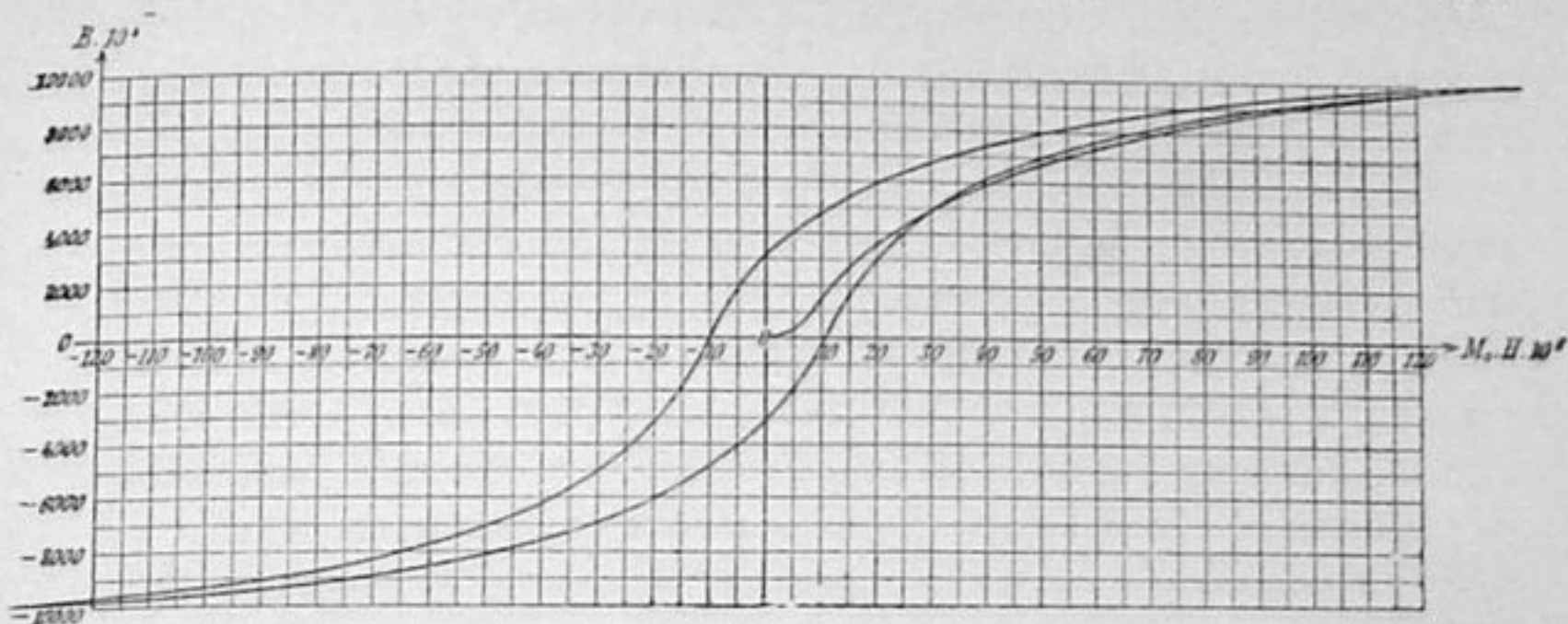


Рис. 237. Кривая намагниченія кобальта.

наиболѣе магнитными оказываются сплавы марганца, алюминія и мѣди (такъ называемыя марганцово-алюминіевыя бронзы). Въ особенности магнитенъ сплавъ, содержащій въ кубическомъ сантиметрѣ одинаковое число атомовъ марганца и алюминія ($MnAl$).

НЕМАГНИТНОЕ ЖЕЛѢЗО.

340. Обратнo, желѣзо или сталь можно сдѣлать немагнитными, сплавляя ихъ съ нѣкоторыми металлами. Яснѣе всего это обнаруживается на марганцовой стали, содержащей 1% углерода и 12% марганца. Юингъ нашель, что даже при весьма высокихъ силахъ поля она не становится ферромагнитной; во всей области измѣреній, произведенныхъ Юингомъ, она обнаружила характерныя свойства парамагнитнаго вещества съ относительно большою проницаемостью, а именно $\mu = 1,4$.

КРИТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ФЕРРОМАГНИТНЫХЪ ТѢЛЪ.

341. Если накаливать желѣзо до-красна, то при определенной температурѣ оно внезапно становится немагнитнымъ. Если его затѣмъ охладить, то оно получаетъ обратно свои ферромагнитныя свойства.

Это можно показать на красивомъ опытѣ съ такъ называемымъ термомагнитнымъ двигателемъ, представляющимъ собою легкое горизон-

тальное колесо, свободно вращающееся на остріѣ. Ободъ колеса сдѣланъ изъ тонкаго листового желѣза и проходитъ между полюсами сильнаго подковообразнаго магнита. Съ одной стороны магнита устанавливають пламя бунзеновской горѣлки, которое накаливаетъ ободъ колеса до-красна. Такъ какъ магнитное поле совершенно не дѣйствуетъ на накалившую до-красна часть обода, то магнитъ всегда притягиваетъ къ себѣ холодную половину колеса, которое вслѣдствіе этого получаетъ вращательное движеніе.

Температура, при которой ферромагнитное вещество внезапно становится немагнитнымъ, называется его критической температурой. Каждому сорту желѣза соотвѣтствуетъ вполне определенная критическая температура; она колеблется для различныхъ сортовъ въ довольно широкихъ предѣлахъ — отъ 690° до 870° . Критическая температура никкеля значительно ниже, а именно, равняется 310° . Вещество испытываетъ при критической температурѣ внезапное измѣненіе не только магнитныхъ, но и всѣхъ своихъ другихъ физическихъ свойствъ: плотности, проводимости и т. д. Очевидно, что при этой температурѣ происходитъ полное измѣненіе структуры. Если нагрѣть желѣзо выше критической температуры и медленно его охлаждать, то наблюдается небольшое переохлажденіе, которымъ часто сопровождаются измѣненія структуры и агрегатнаго состоянія. Вещество становится вновь ферромагнитнымъ лишь при температурѣ ниже критической на два-три градуса.

У многихъ тѣлъ наблюдается и большее переохлажденіе, такъ что точка превращенія можетъ быть значительно удалена отъ точки обратнаго превращенія. Особенно замѣчательно это явленіе въ никкелевой стали. Гопкинсонъ изслѣдовалъ весьма интересный сплавъ желѣза съ 25% никкеля. Этотъ сплавъ сначала былъ немагнитнымъ, подобно марганцовой стали, но послѣ охлажденія ниже 0° сталь магнитнымъ. При нагрѣваніи способность къ намагниченію сохранялась до 580° . Эта температура оказалась точкой превращенія, при которой никкелевая сталь становилась немагнитной. Если перейти критическую точку и затѣмъ обратно понижать температуру, то никкелевая сталь остается немагнитной вплоть до температуры 0° , при которой происходитъ обратное превращеніе. Такимъ образомъ, это вещество можно сохранять въ двухъ разновидностяхъ — способной и неспособной къ намагниченію. Обѣ разновидности явственны отличаются одна отъ другой также и своими другими физическими

свойствами — электрической проводимостью, модулемъ растяженія и т. д.

Сплавы Гейслера также имѣють точку превращенія, въ которой они становятся немагнитными и внезапно измѣняютъ свою плотность. У большинства этихъ сплавовъ критическая точка лежитъ около 200° но иногда и ниже. При охлажденіи прежнія свойства, послѣ небольшой задержки, появляются вновь. Но при нагрѣваніи выше 500° сплавъ испытываетъ глубокое превращеніе: онъ становится немагнитнымъ, и его способность намагничиваться больше уже не возвращается.

ВЛІЯНІЕ ВОЗРАСТА.

342. Въ свѣже приготовленномъ веществѣ магнитныя свойства, подобно всѣмъ вообще свойствамъ матеріи, еще не имѣють постоянного характера. Только черезъ много дней, или недѣль, или даже мѣсяцевъ проницаемость, гистерезисъ и коэрцитивная сила становятся постоянными. Это обстоятельство необходимо имѣть въ виду при изготовленіи постоянныхъ магнитовъ съ вполне установившимися свойствами, на примѣръ, для измѣрительныхъ инструментовъ. „Созрѣваніе“ магнитнаго вещества мѣжно искусственно ускорить, держа его въ теченіе достаточно долгаго времени при постоянной высокой температурѣ (около 100°).

ТЕОРІЯ ФЕРРОМАГНИТИЗМА.

343. Какъ показываетъ кривая на рис. 223, при весьма малыхъ силахъ поля проницаемость ферромагнитнаго вещества относительно мала и мало измѣнчива. Лордъ Рэлей (Rayleigh) изслѣдовалъ желѣзо при чрезвычайно малыхъ силахъ поля (между $0,00003$ и $0,03$ $\frac{\text{амп.-витк.}}{\text{см.}}$) и нашель, что при этихъ условіяхъ желѣзо совершенно сходно съ парамагнитными тѣлами: проницаемость постоянна и велика по сравненію съ другими парамагнитными веществами ($\mu = 81$); соотвѣтственно этому не наблюдается никакихъ слѣдовъ гистерезиса. Только когда сила поля перейдетъ извѣстный предѣль ($0,03$), проницаемость начинаетъ возрастать, сперва медленно, затѣмъ все быстрѣе, и одновременно появляется также гистерезисъ. Мы видѣли уже, что при значительныхъ силахъ поля $B-H$ -кривая вновь загибается, и намагниченіе $\mathfrak{M} = B - M_0 H$ при очень высокой силѣ поля достигаетъ, наконецъ, „насыщающаго значенія“, которое и сохраняется постояннымъ.

Эти факты могут быть объяснены теоретически, если допустить, что молекулярные магниты, изъ которыхъ, по теоріи Вебера, состоитъ магнитное вещество, настолько сильны, что они сильно дѣйствуютъ другъ на друга своими полями. Если намагниченіе равно нулю, то молекулярные магниты не могутъ располагаться совершенно безъ всякаго порядка, но образуютъ множество небольшихъ замкнутыхъ магнитныхъ цѣпей, напримѣръ, какъ четыре магнитика на рис. 238 I. Если возбудить слабое поле, то молекулярные магнитики



Рис. 238. Цѣпи молекулярныхъ магнитовъ.

поля и прибавляютъ къ полю небольшую, пропорциональную ему слагающую. Если поле удалить, то всѣ магнитики возвращаются въ свои прежнія положенія покоя; никакого гистерезиса при этомъ не оказывается. Парамагнитная тѣла, молекулярные

магниты которыхъ испытываютъ всегда лишь малыя отклоненія, остаются въ этой первой стадіи. Наоборотъ, ферромагнитная тѣла, въ которыхъ молекулярные магниты отклоняются гораздо значительнѣе, при извѣстной силѣ поля переходятъ въ новую стадію: молекулярныя магнитныя цѣпи разрываются, и группы молекулъ образуютъ новыя, менѣе устойчивыя системы равновѣсія (рис. 238 II). При переходѣ въ новое положеніе равновѣсія цѣпь сразу весьма сильно увеличиваетъ поле; чтобы объяснить постепенно все болѣе усиливающееся возрастаніе $B-H$ -кривой, мы должны представлять себѣ, что въ новое положеніе равновѣсія переходятъ сначала лишь немногія легко разрывающіяся цѣпи, а за ними все больше и больше другихъ. Если теперь ослаблять магнитное поле, то цѣпи сохраняютъ свое новое положеніе, или только немногія возвращаются къ своему прежнему кольцеобразному распредѣленію. Такимъ образомъ, даже при полномъ исчезновеніи поля вещество остается намагниченнымъ, и лишь поле противоположнаго направленія заставляеть цѣпи возвратиться къ прежнему болѣе устойчивому распредѣленію. Мы видимъ такимъ образомъ, что описанная сейчасъ вторая стадія должна быть связана съ гистерезисомъ. Наконецъ, если всѣ имѣвшіяся первоначальныя

начально магнитныя молекулярныя цѣпи разорваны, то всѣ молекулярныя магниты имѣють направленіе, близкое къ направленію поля, и, во всякомъ случаѣ, всѣ образуютъ съ нимъ острый уголъ; при дальнѣйшемъ усиленіи поля намагниченіе вещества увеличивается лишь оттого, что углы молекулярныхъ магнитовъ съ направленіемъ поля все болѣе и болѣе уменьшаются. Мы подходимъ, такимъ образомъ, къ третьей стадіи, которой соотвѣтствуетъ третья часть *B-H*-кривой, гдѣ послѣдняя послѣ второго изгиба поднимается лишь очень медленно. Пока мы остаемся въ этой третьей части кривой и не переходимъ обратно во вторую, гистерезисъ отсутствуетъ. Наконецъ, когда при весьма большой силѣ поля всѣ молекулярныя магниты становятся почти вполнѣ параллельными направленію магнитнаго поля (рис. 238 III), достигается состояніе насыщенія. При этомъ вступаетъ въ силу такой же законъ наложенія, какъ въ чистомъ эѣирѣ; поле молекулярныхъ магнитовъ достигло предѣльнаго значенія и болѣе уже не усиливаетъ внѣшняго намагничивающаго поля.

Это объясненіе ферромагнитныхъ явленій было дано І. А. Юингомъ (Ewing).

ТЕХНИЧЕСКІЯ ПРИМѢНЕНІЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХЪ
СИЛОВЫХЪ ДѢЙСТВІЙ

СИГНАЛЬНЫЕ АППАРАТЫ.

344. Первымъ по времени техническимъ примѣненіемъ электромагнита является передача сигналовъ. Станція отправленія и станція назначенія соединяются двойнымъ проводомъ, въ который включена гальваническая батарея. На станціи отправленія устанавливается прерыватель, помощью котораго можно замыкать и размыкать токъ; на станціи назначенія устанавливается электромагнитъ, катушка котораго включена въ двойной проводъ. У полюсовъ электромагнита находится либо якорь изъ мягкаго желѣза либо магнитная стрѣлка, движущіеся при замыканіи и размыканіи тока. Пользуясь этими движеніями, можно передавать условные знаки со станціи отправленія на станцію назначенія.

Такой принципъ передачи знаковъ былъ впервые использованъ, съ полнымъ сознаніемъ его общаго значенія, Гауссомъ и Вебе-

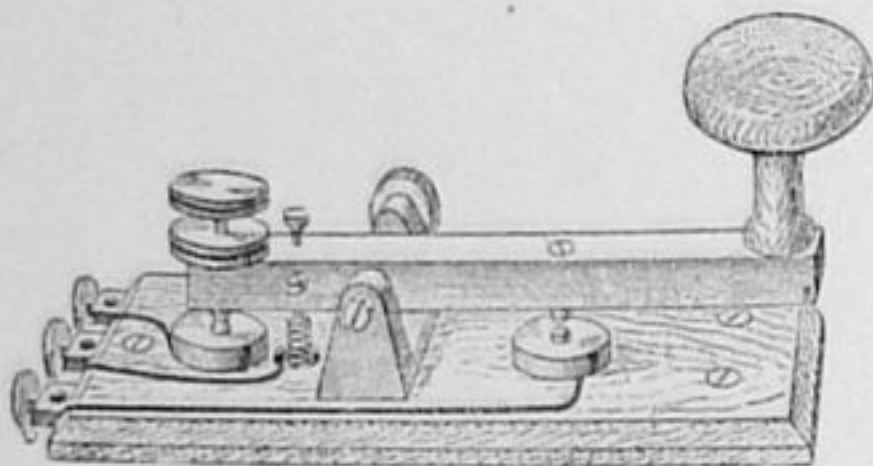


Рис. 239. Телеграфная клавиша.

ромъ въ Геттингенѣ¹⁾ при одномъ изъ ихъ совмѣстныхъ научныхъ изслѣдованій. Въ настоящее время электромагнитная передача сигналовъ на разстояніе примѣняется въ весьма разнообразныхъ случаяхъ, которые здѣсь невозможно перечислить.

¹⁾ Русскій изобрѣтатель баронъ Шиллингъ, одновременно съ названными учеными, построилъ приборъ для передачи извѣстій при помощи движущейся магнитной стрѣлки.

Важнѣйшимъ примѣненіемъ указаннаго принципа является телеграфъ — одно изъ тѣхъ техническихъ изобрѣтеній, которыя даютъ современной жизни ея характерный обликъ. Прерыватель, помощью котораго передаются знаки, — „клавиша“, представленъ на рис. 239. При нажатіи на кнопку клавиши проводъ, идущій на далекое разстояніе и постоянно соединенный съ металлическимъ рычагомъ клавиши, соединяется съ полюсомъ гальванической батареи (см. схему соединенія на рис. 240). Этотъ проводъ идетъ на станцію назначенія, гдѣ онъ соединяется съ однимъ изъ зажимовъ пріемнаго аппарата. Другой зажимъ аппарата и другой полюсъ гальванической батареи соединены проводниками съ землею; соединеніе черезъ землю все

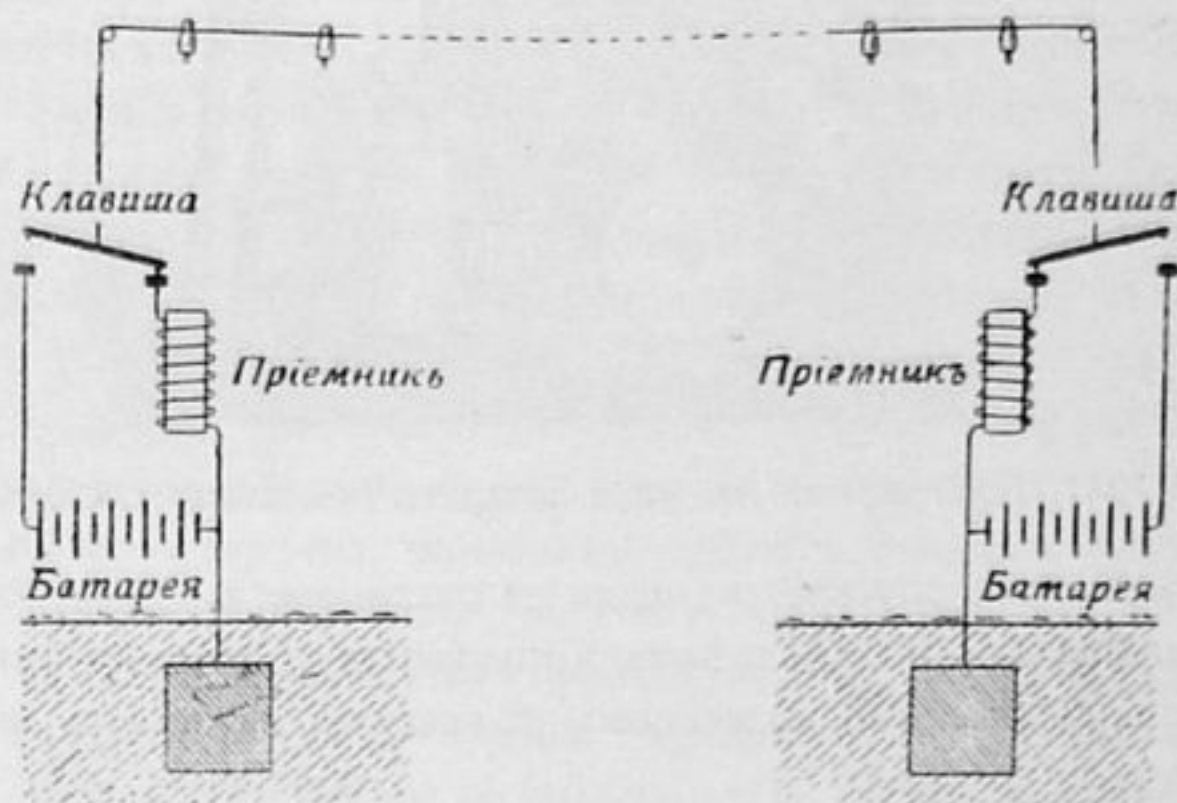


Рис. 240. Соединеніе двухъ телеграфныхъ станцій (схема).

время не прерывается и замѣняетъ собой второй проводъ. Если отпустить кнопку клавиши, то подъ дѣйствіемъ пружины контактъ съ полюсомъ батареи прерывается, а съ другой стороны замыкается соединеніе рычага клавиши, а, слѣдовательно, и провода, идущаго на далекое разстояніе, съ пріемнымъ аппаратомъ станціи. Когда клавиша находится въ покоѣ, здѣсь прямо принимаются телеграммы, передаваемые другой станціей. При такомъ соединеніи для телеграфирования въ обоихъ направленіяхъ нуженъ только одинъ проводъ.

Пріемный аппаратъ, изображенный на рис. 241 нѣсколько схематически, представляетъ собою электромагнитъ, надъ которымъ расположенъ рычагъ съ якоремъ, въ обычномъ положеніи прижатый

пружиной къ нижнему концу винта, который изображенъ съ правой стороны рис. 241. Когда на станціи отправленія включается батарея, сила притяженія электромагнита преодолеваетъ силу пружины, и рычагъ,

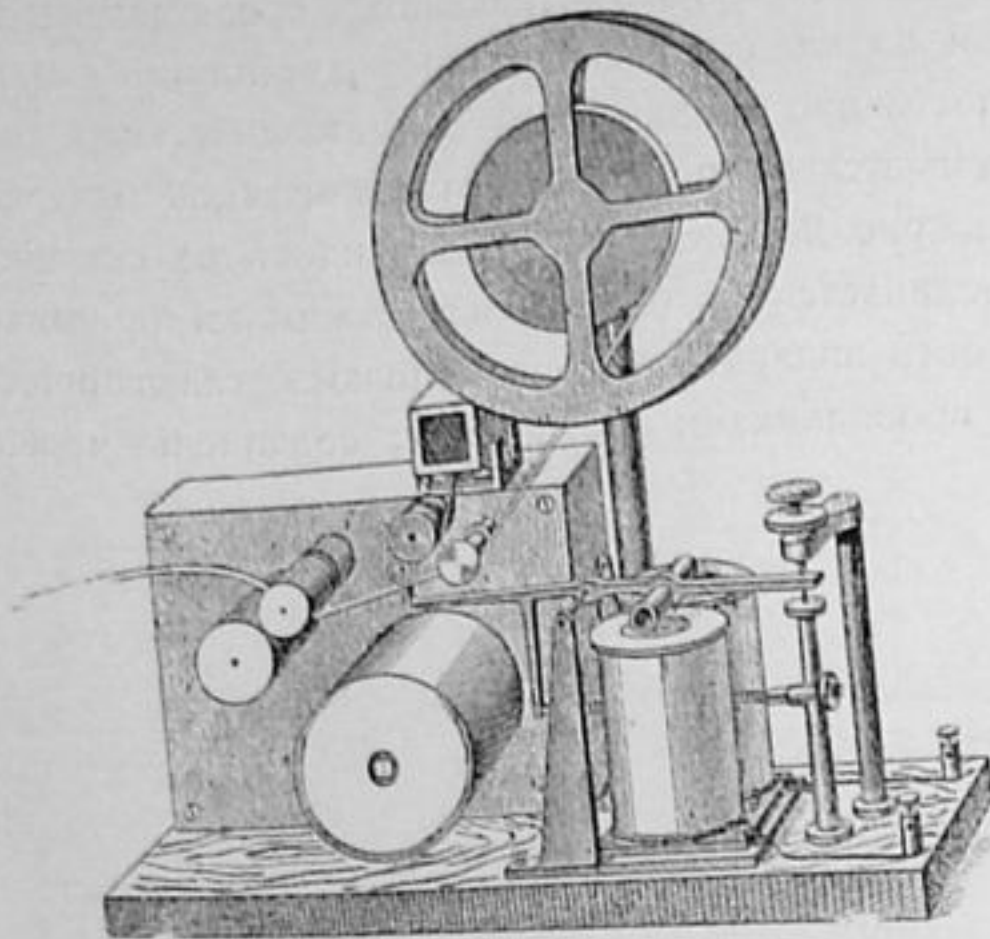


Рис. 241. Телеграфный пишущий аппарат (нѣсколько схематично).

чагъ съ якоремъ опускается; когда же соединеніе прерывается, рычагъ поднимается обратно. Когда рычагъ опускается, то соединенный съ нимъ стержень, снабженный колесикомъ съ краскою, нажимаетъ на бумаж-

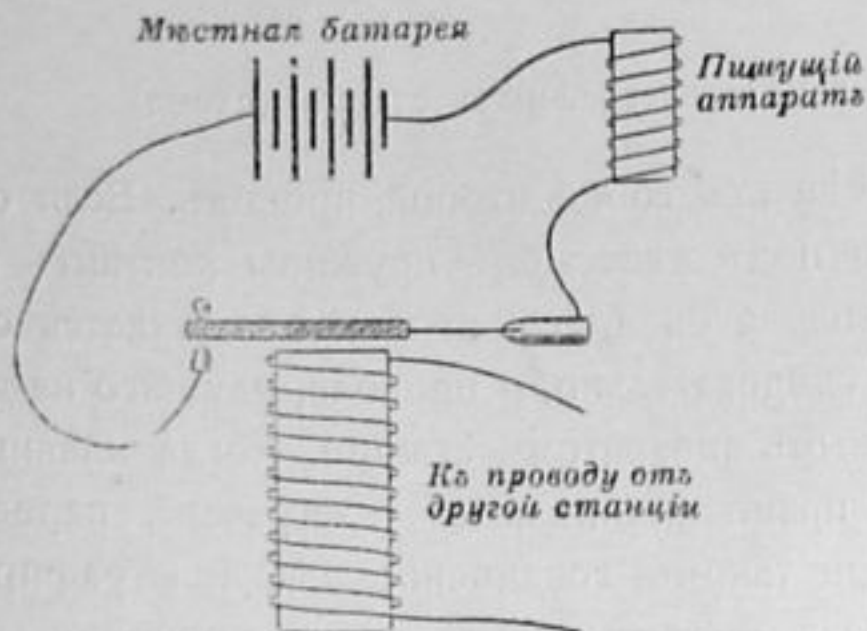


Рис. 242. Схема включенія релѣ.

ную ленту; при подъемѣ рычага надавливаніе на ленту прекращается. Если при помощи часового механизма заставить бумажную ленту передвигаться мимо колесика съ краскою, то сигналы будутъ отмѣчаться на ней въ видѣ длинныхъ или короткихъ черточекъ (точекъ). Морзе (Morse), изобрѣтатель телеграфа та-

кой системы, составилъ изъ черточекъ и точекъ алфавитъ, которымъ и пользуются для телеграфной передачи словъ.

Для получения отчетливо отпечатанныхъ знаковъ на бумажной полосѣ необходимо, чтобы электромагнитъ пріемнаго аппарата намагничивался не слишкомъ слабыми токами. Съ другой стороны, по тонкимъ телеграфнымъ проводамъ должны течь лишь весьма слабые токи, такъ какъ иначе потеря энергіи въ нихъ была бы слишкомъ велика. Чтобы удовлетворить этимъ обоимъ требованіямъ вмѣстѣ, включаютъ въ качествѣ пріемника не прямо пишущій аппаратъ Морзе, но предварительно особый аппаратъ, требующій весьма слабаго тока, — релэ. Послѣдній представляетъ собою не что иное, какъ электромагнитный выключатель, какъ показано на рис. 242. Если чрезъ намагничивающую катушку релэ проходитъ даже весьма слабый токъ, то рычагъ, поддерживаемый пружиной очень малой силы, притягивается внизъ и прижимается къ контактному штифту, соединенному съ однимъ полюсомъ особой, такъ называемой мѣстной батареи. Такимъ образомъ замыкается цѣпь, въ которую включенъ пишущій аппаратъ Морзе и въ которой сила тока можетъ быть доведена до требуемой величины.

Ясно, что къ одному проводу можно присоединить не только двѣ, но и большее число станцій. При телеграфированіи съ одной изъ этихъ станцій телеграмма тотчасъ же получается на всѣхъ станціяхъ, присоединенныхъ къ проводу, но только на той станціи, куда предназначена телеграмма, чиновникъ пускаетъ въ ходъ часовой механизмъ, передвигающій бумажную ленту подъ пишущимъ рычагомъ.

Съ передачей телеграммы приходится всегда ждать до тѣхъ поръ, пока не освободится нужный проводъ. Представляется чрезвычайно важнымъ сократить по возможности время, требуемое для передачи телеграммы. Для этой цѣли на сильно перегруженныхъ телеграфныхъ линіяхъ старая система Морзе замѣняется болѣе новыми системами, требующими болѣе сложныхъ аппаратовъ, но зато работающими несравненно быстрѣе. При помощи остроумныхъ приспособленій удалось добиться также и того, что по одному проводу можно одновременно передавать нѣсколько телеграммъ (до шести).

Особая отрасль техники посвящена подводнымъ кабельнымъ телеграфамъ, соединяющимъ между собою части свѣта. Подводный кабель имѣетъ не только сопротивленіе, но также и большую емкость, тогда какъ его самоиндукція ничтожно мала. Такъ какъ безъ внѣшняго электрическаго поля не можетъ быть тока, а поле невозможно безъ электрическихъ зарядовъ въ проводѣ, то прежде всего долженъ

зарядиться кабель. Если онъ очень длиненъ, то токъ, посылаемый при нажатіи клавиши, заряжаетъ сначала лишь ближайшую часть кабеля. Такимъ образомъ возникаетъ паденіе потенціала между началомъ кабеля и болѣе удаленной его частью, и вслѣдствіе этого возникаетъ токъ, переносящій часть заряда въ болѣе удаленныя части кабеля. Такъ зарядъ передвигается все дальше и дальше, вплоть до станціи назначенія, гдѣ онъ порождаетъ паденіе потенціала и токъ, который и приводитъ въ дѣйствіе пріемный аппаратъ. Если при этомъ напряженія самоиндукціи весьма малы по сравненію съ напряжениями, преодолевающимися омическое сопротивление, то переносъ электрическихъ зарядовъ въ кабелѣ происходитъ по тѣмъ же законамъ, какъ и переносъ теплоты въ хорошо проводящемъ стержнѣ. Если держать одинъ конецъ стержня въ пламени, то, благодаря теплоемкости вещества стержня, притекающая теплота сначала нагреваетъ лишь часть стержня, ближайшую къ этому концу. Вслѣдствіе этого возникаютъ разность температуръ и тепловой токъ, распространяющійся постепенно все дальше и дальше къ другому концу стержня. Подобнымъ же образомъ распространяется электрической токъ въ подводномъ кабелѣ; вслѣдствіе этого сигналы перестаютъ быть кратковременными и какъ бы расплываются. Когда на станціи отправленія токъ сперва быстро замыкаютъ и сейчасъ послѣ этого быстро размыкаютъ, то на пріемномъ аппаратѣ нѣкоторое время спустя замѣчается постепенно усиливающейся токъ, достигающій длительного максимума и затѣмъ снова постепенно падающій до нуля. Поэтому въ кабельной телеграфіи нельзя посылать сигналы быстро одинъ за другимъ, такъ какъ они въ этомъ случаѣ, расплываясь, налагаются другъ на друга. Кромѣ того, здѣсь невозможно употребленіе пишущаго аппарата Морзе, такъ какъ черточекъ нельзя было бы отличить отъ точекъ. Сэръ В. Томсонъ (лордъ Кельвинъ) первый показалъ, что кабельная телеграфія возможна, если въ качествѣ пріемника воспользоваться чувствительнымъ гальванометромъ, отклоненія котораго регистрируются на движущейся лентѣ. Черточки и точки замѣняются въ этомъ случаѣ отклоненіями вправо и отклоненіями влево; поэтому клавиша должна служить одновременно и переключателемъ. Телеграмма получается на движущейся бумажной лентѣ въ видѣ линіи съ выступами вправо и влево; изъ такихъ выступовъ составляется алфавитъ, подобный алфавиту Морзе. Какъ мы увидимъ въ § 426, въ послѣднее время передачу сигналовъ удалось усовершенствовать.

345. Чтобы привести хотя бы одинъ примѣръ изъ безчисленнаго множества другихъ электрическихъ сигнальныхъ аппаратовъ, укажемъ на установленные почти во всѣхъ городахъ электромагнитные часы, автоматически передающіе показаніе нормальныхъ вокзальныхъ часовъ. Здѣсь прерывателемъ, дающимъ сигналы, является колесо нормальныхъ часовъ, совершающее полный оборотъ въ теченіе минуты и послѣ cadaго оборота замыкающее на короткое время токъ. Въ городскихъ часахъ, соединенныхъ съ этими часами, находится небольшой электромагнитъ, который при каждомъ замыканіи тока притягиваетъ рычагъ. На концѣ рычага имѣется небольшой крючекъ, который упирается въ зубчатое колесо и каждый разъ поворачиваетъ его на одинъ зубецъ. Это колесо имѣетъ 60 зубцовъ и снаружи соединено съ минутной стрѣлкой. Такимъ образомъ, черезъ каждую минуту минутная стрѣлка передвигается впередъ на одно дѣленіе циферблата. Кромѣ того, какъ и во всякихъ часахъ, съ минутнымъ колесомъ связано другое колесо, передвигающее соответствующимъ образомъ часовую стрѣлку. Такимъ путемъ электромагнитные часы въ точности воспроизводятъ показаніе нормальныхъ часовъ, находящихся на вокзалѣ.

ТЕЛЕФОНЪ.

346. Телефонъ также можно разсматривать какъ электромагнитный сигнальный аппаратъ. Воспринимающій приборъ, въ который говорятъ, представляетъ собою родъ выключателя тока съ угольнымъ контактомъ. Такой контактъ обладаетъ тѣмъ свойствомъ, что его сопротивление непрерывно мѣняется вмѣстѣ съ давленіемъ, подъ которымъ прижимаются другъ къ другу угольные поверхности. Это легко демонстрировать, соединивъ полюсы аккумулятора съ двумя изолированными горизонтальными угольными стержнями, расположенными рядомъ, и замыкая токъ при помощи третьяго угольнаго стержня, положеннаго сверху поперекъ первыхъ двухъ. Если между аккумуляторомъ и угольнымъ стержнемъ включенъ амперметръ, то сначала онъ обнаруживаетъ

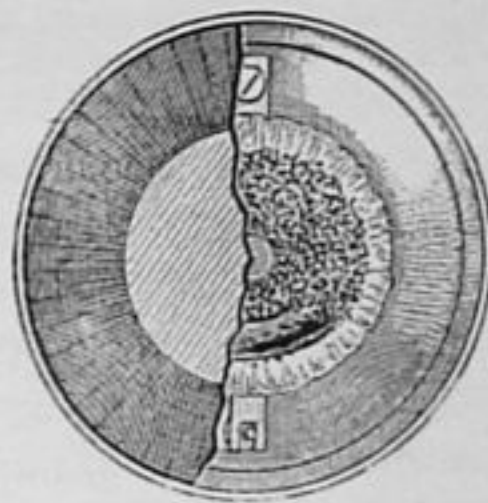


Рис. 243. Микрофонъ изъ угольныхъ зеренъ.

(По срединѣ угольной мембраны приклеенъ сталевоый кружокъ, который можетъ и отсутствовать).

стержня якоря, идутъ къ двумъ изолированнымъ одна отъ другой половинамъ латуннаго кольца, окружающаго ось и представляющаго собою коммутаторъ. По коммутатору скользятъ двѣ щетки — хорошо прилегающія пружинящія латунныя полоски, расположенныя одна противъ другой и соединенныя съ полюсами источника электричества. Благодаря коммутатору, намагниченіе якоря мѣняется свой знакъ послѣ каждого полуоборота; щетки же установлены такимъ обра-

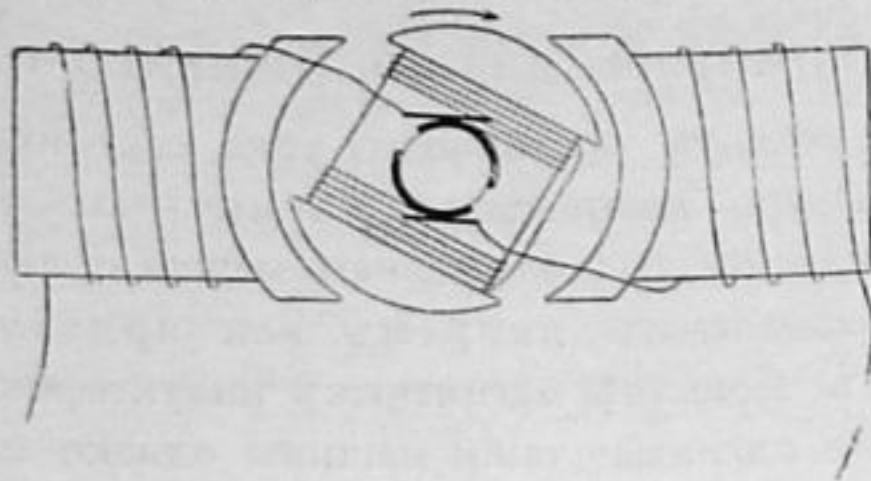


Рис. 250. Схема стараго двойного-Т-якоря.

зомъ, что перемагниченіе полюсовъ якоря происходитъ какъ разъ въ тотъ моментъ, когда они проходятъ мимо полюсовъ магнитнаго индуктора. Пока полюсъ якоря еще приближается къ полюсу индуктора, онъ притягивается послѣднимъ; въ моментъ, когда полюсъ якоря находится какъ разъ противъ полюса индуктора и начинаетъ отъ послѣдняго удаляться, онъ получаетъ обратный знакъ и начинаетъ поэтому отталкиваться полюсомъ индуктора, и въ то же время другой полюсъ индуктора начинаетъ его притягивать. Такимъ образомъ движеніе якоря непрерывно поддерживается и въ томъ случаѣ, когда онъ производитъ работу (рис. 250).

349. Описанный старинный моторъ обладаетъ многими недостатками. Онъ имѣетъ весьма неравномерный ходъ, такъ какъ вращающій моментъ, поддерживающій движеніе его якоря, дѣйствуетъ толчками. Этотъ моментъ очень великъ, когда башмаки якоря начинаютъ двигаться къ башмакамъ индуктора или начинаютъ отъ нихъ удаляться. Но въ моментъ перемѣны направленія тока, когда якорный стержень какъ разъ соединяетъ оба полюса индуктора, вращающій моментъ равенъ нулю. Такимъ образомъ, старый моторъ движется толчками и, чтобы получить достаточно равномерное вращеніе, моторъ нужно снабдить тяжелымъ маховымъ колесомъ. Изъ прочихъ его недостатковъ упомянемъ лишь еще одинъ: въ мо-

ментъ обращенія поля въ якорѣ, на коммутаторѣ неизбежно появляются сильныя искры вслѣдствіе большой самоиндукціи якоря; онѣ поглощаютъ много энергіи и разрушаютъ вещество щетокъ и коммутатора. Эти и другіе недостатки устранены въ современныхъ электромоторахъ. Однимъ изъ общеизвѣстныхъ большихъ преимуществъ этихъ машинъ является ихъ движеніе подъ совершенно равномернымъ силовымъ дѣйствіемъ, вслѣдствіе чего онѣ вращаются безъ всякаго махового колеса съ удивительной равномерностью. Это достигается улучшеніемъ формы якоря и метода коммутации. Желѣзный сердечникъ якоря въ современномъ электромоторѣ имѣетъ форму

тѣла вращенія (желѣзное кольцо или желѣзный цилиндръ), вслѣдствіе чего его вращеніе не оказываетъ вліянія на поле магнитнаго индуктора. Коммутаторъ раздѣленъ не на два только, а на большое число сегментовъ, соединенныхъ съ небольшими частями якорной обмотки. Вслѣдствіе этого токъ, намагничивающій якорь, никогда не коммутируется во всей обмоткѣ сразу, но всегда лишь въ малой ея части и при томъ такимъ образомъ, что вращающіеся вмѣстѣ

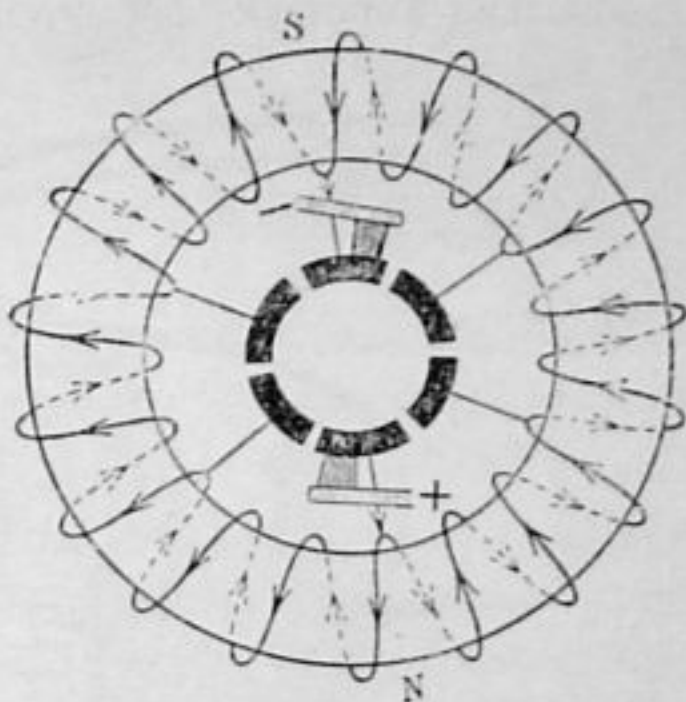


Рис. 251. Схема кольцевого якоря.

съ якоремъ полюсы въ моментъ, когда щетка переходитъ на слѣдующій сегментъ коммутатора, снова отскакиваютъ на свое старое мѣсто. Такимъ образомъ, полюсы якорнаго магнита непрерывно остаются приблизительно въ однихъ и тѣхъ же мѣстахъ поля, лишь немного качаясь въ обѣ стороны отъ своего средняго положенія. Какъ это достигается, проще всего можно уяснить себѣ путемъ разсмотрѣнія представленной на рис. 251 схемы кольцевого якоря (изобрѣтенъ Пачинотти (Pacinotti) въ 1860 г. и позже независимо Граммомъ (Gramme) въ 1868 г.). Такой якорь вращается подъ равномернымъ силовымъ дѣйствіемъ. Кромѣ того, образованіе искръ вслѣдствіе самоиндукціи здѣсь весьма ослаблено, такъ какъ токъ коммутируется всегда лишь въ малой части всей обмотки. На рис. 252 представленъ небольшой моторъ съ кольцевымъ якоремъ. Мы видимъ здѣсь коммутаторъ со многими сегментами, по которому скользятъ

щетки, затѣмъ соединительные провода между сегментами коммутатора и частями обмотки якоря и самое кольцо, густо обмотанное изолированной проволокой и точно пригнанное въ цилиндрическое пространство между башмаками магнитнаго индуктора. Каждая щетка состоитъ изъ толстой пружинящей латунной полосы, которая спереди несетъ въ оправѣ четырехугольный кусокъ угля, прижимаемый латунной пружиной къ коммутатору. На большинствѣ новѣйшихъ машинъ можно видѣть подобнаго рода угольные щетки, оказавшія весьма практичными.

Моторъ, представленный на рис. 252, самъ по себѣ имѣетъ уже довольно хорошую форму, но все-таки не является еще совре-

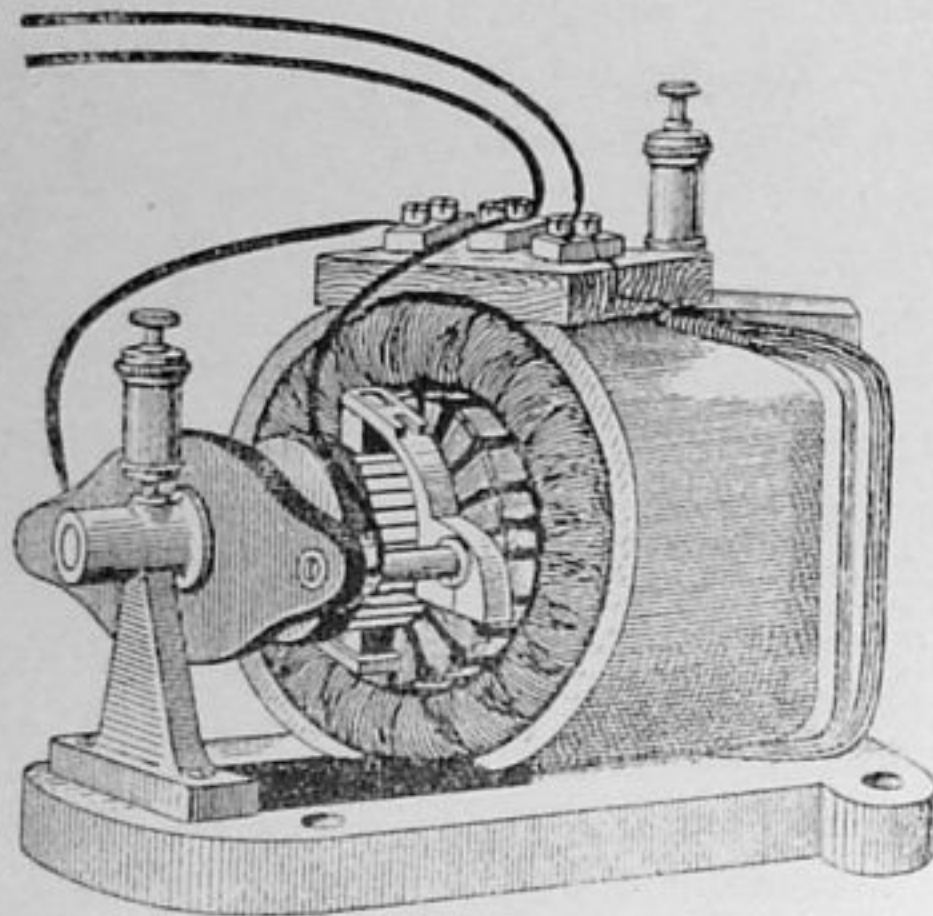


Рис. 252. Маленькій электромоторъ съ кольцевымъ якоремъ.

менной машиной. За послѣднія десятилѣтія кольцевой якорь совершенно вытѣсненъ барабаннымъ якоремъ (изобрѣтенъ Гефнеръ-Альтенекъ (Hefner-Alteneck) въ 1872 г.), который отличается отъ кольцевого якоря главнымъ образомъ тѣмъ, что въ немъ отсутствуютъ части проволочной обмотки внутри кольца, которыя не способствуютъ увеличенію намагничивающаго числа амперъ-витковъ якорной обмотки. Напримѣръ, намагничивающее число амперъ-витковъ кольца, представленнаго на рис. 251, опредѣляется полною силою тока въ проводахъ на внѣшней сторонѣ, который вправо отъ

линии SN выступает изъ плоскости рисунка, а влево отъ нея входитъ въ плоскость рисунка. Такимъ образомъ, проволоки, расположенныя на внутренней поверхности кольца, не приносятъ никакой пользы, и съ ними, напротивъ, связанъ рядъ значительныхъ неудобствъ: 1) излишній расходъ мѣди, повышающій стоимость машины; 2) услож-

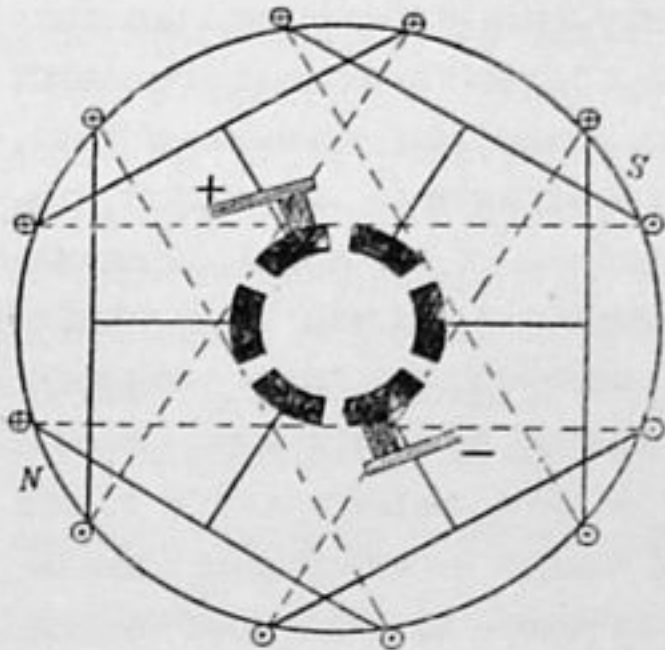


Рис. 253. Схема барабаннаго якоря.

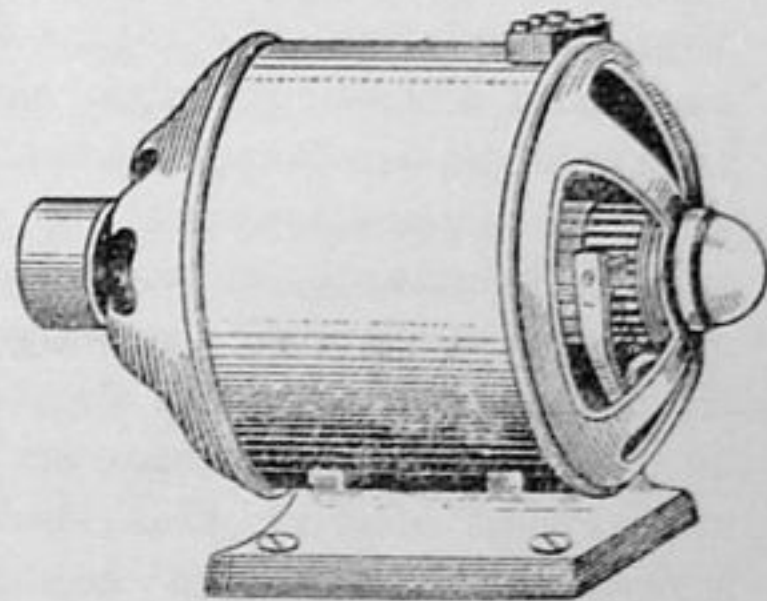


Рис. 254. Небольшой закрытый электромоторъ.

неніе работы наматыванія проволоки на якорь; 3) увеличеніе сопротивленія якорной обмотки. Какимъ образомъ можно упразднить внутренніе витки проволоки и получить барабанную якорную обмотку, расположенную только на поверхности цилиндрическаго желѣзнаго сердечника, показываетъ схема такой обмотки на рис. 253. Каждая изъ штриховыхъ линий съ двумя маленькими кружками на концахъ представляетъ тонкую проволочную катушку,

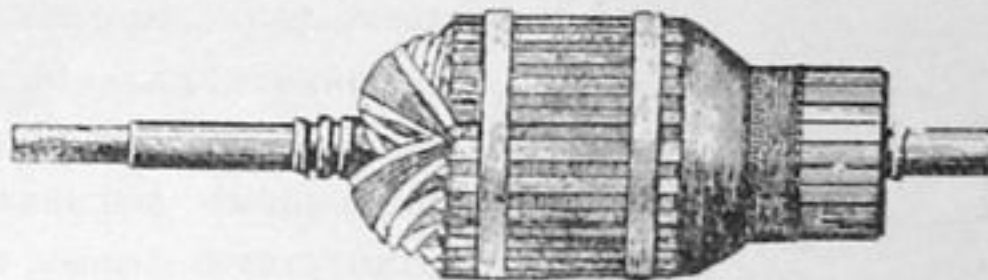


Рис. 255. Барабанный якорь.

намотанную на желѣзный сердечникъ; плоскость витковъ ея параллельна оси барабана. Два маленькіе кружка представляютъ сѣченія пучка проволокъ, идущаго по поверхности барабана параллельно оси. Въ пучкахъ проволокъ, отмѣченныхъ знакомъ \oplus , токъ идетъ по направленію отъ зрителя къ плоскости чертежа, а въ пучкахъ, отмѣченныхъ знакомъ \ominus , — въ обратномъ направленіи. Концы каждой ка-

чивающих катушек и пропущенный через них намагничивающий ток, который требуется для того, чтобы в воздушном промежутке получилось поле $B \frac{\text{вольт-сек.}}{\text{кв. см.}}$. Сечения f_a, f_m, f_j должны быть таковы, чтобы значения B_a, B_m, B_j лежали около изгиба $B-H$ кривой (т. е. $B = 12000 \cdot 10^{-8} \frac{\text{вольт-сек.}}{\text{кв. см.}}$). При таких условиях магнитное свойство железа будет использовано наилучшим образом, и в воздушной щели будет достигнуто сильное поле при относительно малой массе железа и малом числе ампер-витков.

Следует еще заметить, что мы произвели наше вычисление таким образом, как будто силовые линии оставались целиком в железе машины. Если бы это имело место, то, несмотря на сильное магнитное поле в воздушной щели, вокруг машины не наблюдалось бы ни малейших магнитных действий. В этом случае железные массы были бы использованы самым выгодным образом. В действительности же всегда небольшая часть силовых линий местами проходит через воздух. Линии, образующие в воздухе, наряду с силовым потоком в железе, как бы побочный магнитный поток, называются разсѣянными линиями. Отношение силового потока, проходящего через железо, ко всему силовому потоку, которое должно быть возможно ближе к единице, называется коэффициентом разсѣяния. Чтобы внести поправки, при точном вычислении в качестве множителей вводятся эмпирически найденные приближенные коэффициенты разсѣяния для отдельных частей магнитной цепи.

Поставь для магнита изготавливается из сталеваго чугуна. Этот материал при правильной выработке обладает почти столь же большой проницаемостью, как и лучшее мягкое железо, и по сравнению с последним обладает тем важным свойством, что поддается отливке. Сердечник якоря, наоборот, дѣлается из полосового мягкаго железа; причина этого выяснится ниже (§ 353).

РЕАКЦІЯ ЯКОРЯ.

351. Поверхность якоря распадается на двѣ области одинаковой величины: через одну магнитныя силовыя линии входят, через другую онѣ выходят. Линія раздѣла этихъ двухъ областей носитъ название нейтральной зоны. Полный вращающій моментъ, дѣйствующий

щій на якорь въ полѣ, равняется суммѣ отдѣльныхъ вращающихъ силъ, которыя дѣйствуютъ на отдѣльныя проволоки съ токомъ и легко могутъ быть вычислены, согласно § 320. Наилучшее дѣйствіе получается въ томъ случаѣ, если направленіе тока одинаково во всѣхъ проволокахъ одной изъ двухъ областей и противоположно во всѣхъ проволокахъ другой области, иными словами, если коммутация тока въ якорной проволоцѣ происходитъ всегда въ тотъ моментъ, когда онъ проходитъ черезъ нейтральную зону. Но нейтральная зона должна быть наклонной къ линіи, соединяющей полюсы (рис. 257), такъ какъ якорный токъ не можетъ идти такимъ образомъ, чтобы его магнитное поле было параллельно полю магнитнаго индуктора. Такимъ образомъ, для полученія наилучшей коммутации, щетки не должны быть симметричны относительно магнитнаго индуктора, но должны быть отклонены изъ положенія симметріи на извѣстный уголъ, противоположный направленію вращенія якоря. Этотъ уголъ называется угломъ сдвига щетокъ.

Сдвигъ щетокъ необходимъ не только для достиженія возможно большаго силового дѣйствія. Коммутация должна происходить въ области нейтральной зоны главнымъ образомъ уже потому, что только въ этомъ случаѣ она почти не сопровождается образованіемъ искръ на щеткахъ. Въ этомъ отношеніи лучше всего, если коммутация происходитъ не какъ-разъ въ нейтральной зонѣ, но немного раньше, какъ это ясно видно изъ расположенія щетокъ на рис. 257.

Вслѣдствіе сдвига щетокъ часть якорныхъ витковъ даетъ нѣкоторое число амперъ-витковъ параллельно линіи соединенія обоихъ полюсовъ магнитнаго индуктора, какъ это видно на рис. 257; эти амперъ-витки якоря противоположны полю индуктора.

Вслѣдствіе сдвига щетокъ часть арматурной обмотки получаетъ размагничивающее дѣйствіе, тѣмъ большее, чѣмъ сильнѣе арматурный токъ.

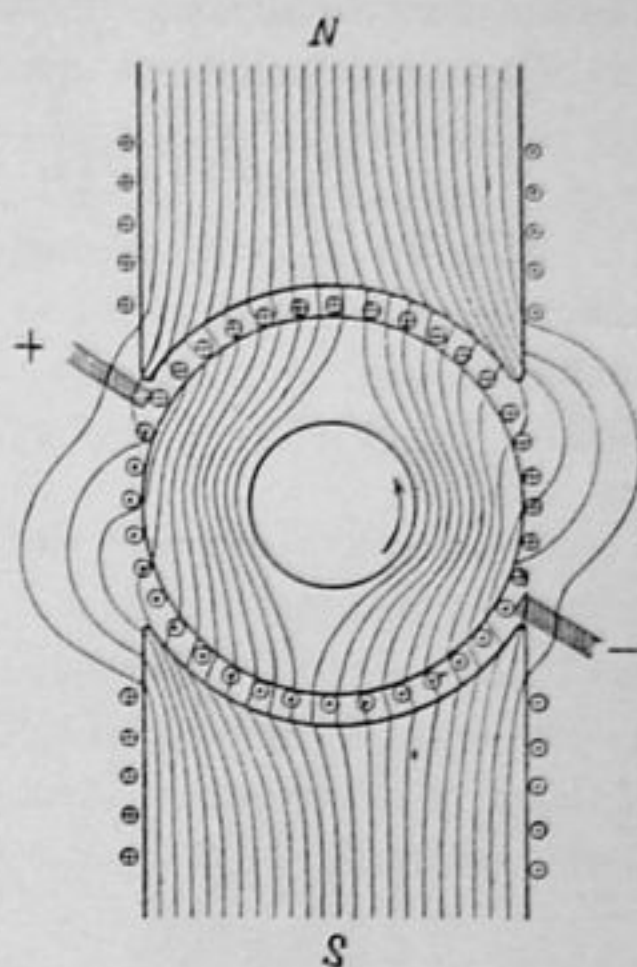


Рис. 257. Реакція якоря.

Это размагничивающее дѣйствіе называютъ также реакціей якоря. Ее необходимо учитывать при вычисленіи числа амперъ-витковъ магнитнаго индуктора, прибавляя такое число амперъ-витковъ, какое составляетъ реакція якоря при нормальномъ арматурномъ токъ. Поперечное намагничивающее дѣйствіе остальной якорной обмотки не имѣетъ большого вліянія на расчетъ машины.

ОБОРОТЪ ЭНЕРГІИ ВЪ МОТОРѢ.

352. То количество энергіи, которое моторъ, находящійся въ дѣйствиіи, отдаетъ непрерывно въ видѣ работы, должно быть, конечно, сообщено ему другимъ источникомъ въ видѣ электрической энергіи. Можно уяснить себѣ это путемъ простаго измѣренія. На рис. 258

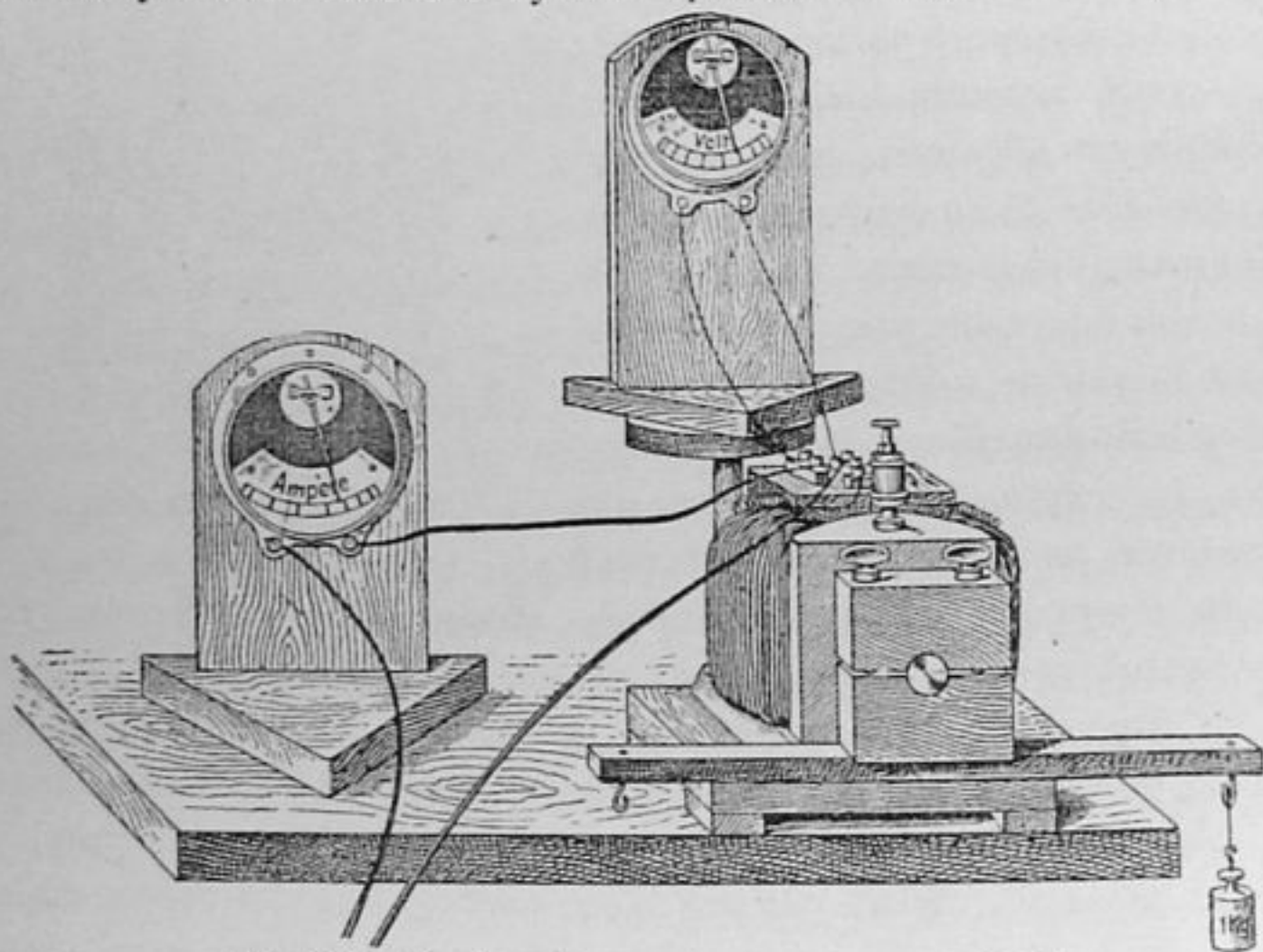


Рис. 258. Измѣреніе энергіи на маломъ моторѣ.

представленъ небольшой электромоторъ, съ оси котораго энергія снимается при помощи тормоза — такъ называемаго нажима Прони (Prony). Пользуясь этимъ тормозомъ, можно измѣрить энергію, отдаваемую моторомъ въ видѣ работы. Нажимъ Прони состоитъ изъ двухъ деревянныхъ обхватокъ, между которыми какъ-разъ приходится шкивъ мотора; при помощи винтовъ эти обхватки могутъ быть болѣе или менѣе сильно прижаты къ шкиву. Одна изъ обхватокъ снабжена небольшимъ рычагомъ, при помощи котораго ее можно

удерживать неподвижной въ то время, какъ шкивъ вращается съ трениемъ между обхватками. Силу трения можно измѣрить, привѣсивъ къ рычагу такой грузъ въ P килограммовъ (въ нашемъ примѣрѣ $P = 1$ кгр.), который при вращеніи мотора какъ-разъ удерживается трениемъ въ горизонтальномъ положеніи. Тогда моторъ увлекаетъ его съ силой, которая уравнивается вращающимъ моментомъ, равнымъ $a \cdot P$ кгр.-м., гдѣ a есть горизонтальное разстояніе груза отъ центра шкива, измѣренное въ метрахъ. Если моторъ дѣлаетъ въ секунду n оборотовъ, то онъ отдаетъ энергію

$$2 \pi \cdot n \cdot a \cdot P \frac{\text{кгр.-метр.}}{\text{сек.}} = \frac{2 \pi \cdot n \cdot a \cdot P}{75} \text{PS.}$$

Эта работа совершенно уничтожается въ тормозѣ, и тамъ образуется эквивалентное количество теплоты трения.

Съ другой стороны, можно измѣрить энергію, сообщаемую мотору электрическимъ путемъ. Для этого нужно включить въ подводящіе токъ провода амперметръ и соединить оба подводящіе зажима мотора съ измѣрителемъ напряженій. Положимъ, что измѣренная сила тока равняется J амперамъ, а напряженіе у зажимовъ V вольтамъ; въ такомъ случаѣ, по теоремѣ Пойнтинга, сообщаемая мотору энергія составляетъ

$$V \cdot J \text{ ваттъ.}$$

Для маленькаго мотора, изображеннаго на рис. 258 (такъ называемаго мотора съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ), измѣреніе дало, на примѣръ, $J = 9$ амперъ, $V = 100$ вольтъ; слѣдовательно, доставлено 900 ваттъ = 1,22 лош. силы. Доставляемая мотору энергія распадается на двѣ части; одна часть идетъ на теплоту тока, другая на производство работы. Соответственно этому, количество V состоитъ изъ двухъ слагаемыхъ: $V = V_0 + V'$, гдѣ $V_0 = R \cdot J$ есть напряженіе, необходимое для преодоленія омическаго сопротивленія, а напряженіе V' уравниваетъ электродвижущую силу магнитнаго поля въ воздушной щели мотора, черезъ которую движутся витки якорной обмотки. $V_0 \cdot J$ есть теплота тока, $V' \cdot J$ — энергія, превращаемая въ работу. Чтобы отдѣлить одно отъ другого эти два слагаемыхъ, можно произвести слѣдующій опытъ. Нажимъ Прони нажимаютъ столь сильно, чтобы скольженіе шкива было невозможно, и какимъ-либо образомъ закрѣпляютъ рычагъ. Въ такомъ случаѣ моторъ вращаться не можетъ; если теперь при помощи включеннаго сопротивленія урегулировать силу тока такъ, чтобы въ моторѣ снова

вступали J амперъ, то вольтметръ покажетъ напряженіе V_0 , которое уравниваетъ омическое сопротивленіе. Для маленькаго упомянутого выше мотора было такимъ путемъ найдено, что $V_0 = 12$ вольтъ, если сила тока $J = 9$ амперамъ. Мы имѣемъ, слѣдовательно:

$$100 \text{ вольтъ} = 88 \text{ вольтъ} + 12 \text{ вольтъ};$$

$$900 \text{ ваттъ} = 792 \text{ ватта} + 108 \text{ ваттъ}.$$

Изъ всей доставляемой мотору электрической энергіи 88% идутъ на работу ($792 \text{ ватта} = 1,07 \text{ PS}$), а 12% — на нагреваніе проволоки въ моторѣ.

Одновременно произведенное измѣреніе работы при помощи нажима Прони дало $0,91 \text{ PS}$, т.-е. на 15% меньше, нежели электрическое измѣреніе. Отсюда слѣдуетъ, что при переходѣ электрической энергіи въ работу происходятъ еще нѣкоторыя другія небольшія потери. Къ этому вопросу мы возвратимся въ слѣдующемъ параграфѣ.

Ясно, во всякомъ случаѣ, что, если моторъ работаетъ экономно, то теплота тока должна быть незначительной по сравненію съ работой.

Напряженіе между подводящими зажимами электромотора состоитъ изъ двухъ частей: во-первыхъ, изъ напряженія, индуктируемаго въ проволокахъ якоря при ихъ движеніи въ магнитномъ полѣ, во-вторыхъ, изъ потери напряженія вслѣдствіе омическаго сопротивленія. Если моторъ построенъ правильно, то первая величина должна быть во много разъ больше второй.

Отсюда вытекаетъ практически важное слѣдствіе. Если бы сообщить мотору, прежде чѣмъ онъ придетъ въ движеніе, сразу полное напряженіе V , то вслѣдствіе отсутствія индуктированнаго напряженія въ якорь вошелъ бы токъ, который, согласно закону Ома, во много разъ больше тока J , при которомъ моторъ правильно идетъ. А такъ какъ проволока якорной обмотки и намагничивающихъ катушекъ, конечно, берется лишь такой толщины, какая необходима для тока нормальной силы J или немного болѣе сильнаго, то вслѣдствіе огромной начальной силы тока проволока при этомъ раскалилась бы, спаи расплавились бы, и изоляція витковъ перегорѣла бы, послѣ чего моторъ потребовалъ бы довольно сложной починки.

Чтобы не испортить обмотки электромотора, онъ непремѣнно долженъ имѣть „пусковое“ сопротивленіе. При

пусканіи въ ходъ мотора слѣдуетъ выключать это сопротивленіе лишь постепенно и выключить вовсе только послѣ того, какъ моторъ достигнетъ полнаго числа оборотовъ.

Обмотка можетъ перегорѣть также и въ томъ случаѣ, когда моторъ перегруженъ и потому вращается послѣ выключенія всего сопротивленія слишкомъ медленно. Чтобы предотвратить поврежденіе вслѣдствіе небрежности при включеніи или вслѣдствіе перегрузки, слѣдуетъ включать въ подводящіе провода предохранители, которые перегораютъ ранѣе, нежели сила тока становится опасной.

ПОТЕРИ ЭНЕРГІИ ВЪ ЯКОРНОМЪ ЖЕЛѢЗѢ.

353. Какъ уже было упомянуто, энергія, измѣренная нажимомъ Прони, нѣсколько меньше, нежели электрически доставляемая энергія за вычетомъ теплоты тока. Нѣкоторая малая часть энергіи теряется вслѣдствіе тренія осей въ подшипникахъ, но и кромѣ этого якорное желѣзо поглощаетъ еще небольшое количество энергіи.

Такъ какъ желѣзо является проводникомъ, то при вращеніи въ сильномъ магнитномъ полѣ оно испытываетъ дѣйствіе тормозящей силы, вслѣдствіе возбужденія вихревыхъ токовъ. Какъ слѣдуетъ изъ опытовъ, описанныхъ въ § 301, эта тормозящая сила была бы чрезвычайно велика и вызывала бы огромнѣйшую потерю энергіи, если бы желѣзный сердечникъ былъ массивнымъ металлическимъ тѣломъ. Практическая пригодность электромоторовъ была бы тогда весьма сомнительна. Къ счастью, вихревые токи можно почти совершенно уничтожить, составляя желѣзный сердечникъ арматуры изъ тонкихъ желѣзныхъ полосъ, изолированныхъ одна отъ другой бумажными прокладками. Изъ желѣзныхъ полосъ, оклеенныхъ съ одной стороны бумагой, вырѣзаютъ круглыя пластинки, размѣры которыхъ опредѣляются поперечнымъ сѣченіемъ устраиваемаго якоря, и иногда снабжаютъ ихъ углубленіями на краю для образованія каналовъ на поверхности якоря. Затѣмъ эти пластинки накладываются одна на другую и сжимаются винтами такимъ образомъ, что онѣ образуютъ цилиндръ надлежащей формы и величины. На рис. 255 видно, какъ желѣзный сердечникъ якоря составленъ изъ пластинокъ. Такъ какъ плоскость каждой полосы расположена параллельно силовымъ линіямъ тока, то въ ней могутъ образоваться лишь крайне слабые вихревые токи, и вызываемая ими потеря энергіи достигаетъ лишь нѣсколькихъ процентовъ.

Точно такъ же во всѣхъ электромагнитныхъ аппаратахъ (машинахъ и трансформаторахъ) тѣ желѣзныя части, которыя при работѣ все время болѣе или менѣе перемагничиваются, изготовляются изъ полосагого желѣза или изъ пучковъ изолированной желѣзной проволоки.

Кромѣ вихревыхъ токовъ, существуетъ еще другая причина потери энергіи въ якорномъ желѣзѣ, именно магнитный гистерезисъ, вслѣдствіе чего слѣдуетъ употреблять для арматурныхъ полосъ матеріалъ съ крайне узкой петлей гистерезиса. Поэтому важно обладать инструментами въ родѣ прибора Кепселя, съ помощью которыхъ можно быстро изслѣдовать магнитныя свойства даннаго сорта желѣза.

СКОРОСТЬ ВРАЩЕНІЯ МОТОРА.

354 Скорость вращения мотора постояннаго тока зависитъ непосредственно отъ двухъ величинъ: во-первыхъ, отъ силы магнитнаго поля въ воздушной щели и, во-вторыхъ, отъ напряженія между щетками, уменьшеннаго на омическую потерю напряженія. Можно экспериментально изслѣдовать вліяніе каждой изъ этихъ величинъ въ отдѣльности, если пустить моторъ при помощи независимаго возбужденія, т.-е. если соединить намагничивающія катушки и щетки мотора съ двумя отдѣльными источниками электричества.

Если сначала поддерживать постоянное напряженіе между щетками и измѣнять намагничивающій токъ при помощи включеннаго въ цѣпь реостата, то оказывается, что моторъ вращается тѣмъ медленнѣе, чѣмъ сильнѣе магнитное поле. Если увеличивать сопротивление, то моторъ вращается все быстрѣе и быстрѣе, и наибольшее число оборотовъ получается, когда намагничивающій токъ совершенно выключается и поле поддерживается лишь остаточнымъ намагниченіемъ. Это обстоятельство легко понять, если вспомнить, что за вычетомъ относительно малой омической потери напряженія, напряженіе у щетокъ должно равняться напряженію, индуктированному въ якорѣ, т.-е. должно быть пропорціонально произведенію изъ скорости вращения на силу магнитнаго поля. При неизмѣнномъ напряженіи на щеткахъ это произведеніе имѣетъ поэтому приблизительно постоянную величину.

При постоянномъ напряженіи у щетокъ скорость вращения мотора тѣмъ больше, чѣмъ слабѣе магнитное поле

въ воздушной щели, и почти въ точности обратно пропорціональна силѣ поля.

Если поддерживать постояннымъ намагничивающій токъ и измѣнять напряженіе у щетокъ, то оказывается, что число оборотовъ увеличивается тѣмъ болѣе, чѣмъ больше напряженіе. Это обстоятельство также легко понять послѣ вышеприведенныхъ разсужденій.

При постоянной силѣ магнитнаго поля скорость вращенія мотора возрастаетъ почти въ точности пропорціонально напряженію у щетокъ.

МОТОРЪ СЪ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМЪ ВОЗБУЖДЕНІЕМЪ.

355. Обычно пользуются однимъ и тѣмъ же источникомъ тока какъ для возбужденія магнитнаго индуктора, такъ и для арматурнаго тока; при этомъ нужно различать два существенно различные типа моторовъ постоянного тока, въ зависимости отъ того, включаются ли арматура и катушки индуктора параллельно или же послѣдовательно.

Способъ включенія мотора перваго типа — мотора съ параллельнымъ возбужденіемъ — представленъ схематически на рис. 259. Въ этомъ случаѣ все потребляемое напряженіе V приложено къ намагничивающимъ катушкамъ, и намагничивающій токъ J' долженъ быть весьма малъ по сравненію съ арматурнымъ токомъ J , такъ какъ теплота тока въ катушкахъ $V \cdot J'$ должна быть весьма мала по сравненію съ энергіей $V \cdot J$, дающей работу. Поэтому для полученія достаточнаго числа амперъ-витковъ при маломъ значеніи J' , катушки должны имѣть очень большое число витковъ.

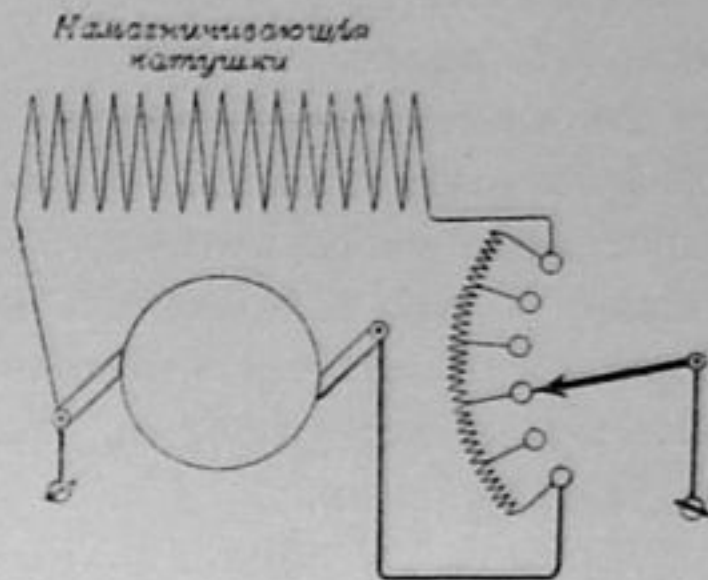


Рис. 259. Схема включенія мотора съ параллельнымъ возбужденіемъ, снабженнаго пусковымъ сопротивленіемъ.

Намагничивающія катушки мотора съ параллельнымъ возбужденіемъ должны имѣть гораздо большее сопротивление, нежели цѣпь арматурнаго тока; онѣ должны состоять изъ очень большого числа оборотовъ тонкой проволоки.

Положимъ теперь, что къ щеткамъ и къ намагничивающимъ катушкамъ приложено нормальное напряженіе V , при которомъ моторъ

работаетъ наилучшимъ образомъ. Если нѣсколько увеличимъ нагрузку мотора, то число его оборотовъ, вообще, немного уменьшится. Поэтому и индуктированное напряженіе V' уменьшится, а арматурный токъ нѣсколько возрастетъ, пока сумма $V' + J.R$ не станетъ снова равной V (здѣсь R — сопротивленіе якорной обмотки); напротивъ, токъ въ намагничивающихъ катушкахъ остается совершенно неизмѣннымъ. Поэтому вслѣдствіе увеличенія реакціи якоря сила поля въ воздушной щели нѣсколько понижается, благодаря чему происходитъ дальнѣйшее убываніе V' , т.-е. снова возрастаетъ арматурный токъ, и т. д. Если машина вѣрно рассчитана, то можно достигнуть того, что ослабленіе магнитнаго поля вслѣдствіе реакціи якоря, при малѣйшемъ измѣненіи скорости, тотчасъ будетъ вызывать большое возрастаніе силы тока. Но такъ какъ токъ возрастаетъ лишь до тѣхъ поръ, пока сила, дѣйствіе которой испытываетъ якорная обмотка въ магнитномъ полѣ, не станетъ вновь равна приложенной извнѣ силѣ, то измѣненіе нагрузки, какъ мы видимъ, имѣетъ довольно большое вліяніе на силу якорнаго тока, но весьма малое на число оборотовъ.

Правильно построенный моторъ съ параллельнымъ возбужденіемъ имѣетъ при всѣхъ нагрузкахъ почти одинаковое число оборотовъ.

Въ этомъ заключается характерное свойство мотора съ параллельнымъ возбужденіемъ, обуславливающее его чрезвычайную пригодность для многихъ цѣлей, на примѣръ, для приведенія въ дѣйствіе станковъ и другихъ подобныхъ машинъ. Если же постоянство числа оборотовъ не является необходимымъ условіемъ, то моторъ съ параллельнымъ возбужденіемъ представляется мало практичнымъ по слѣдующей причинѣ:

Моторъ съ параллельнымъ возбужденіемъ не развиваетъ при пускѣ въ ходъ большой двигательной силы.

Это обстоятельство зависитъ отъ того, что магнитное поле мотора съ параллельнымъ возбужденіемъ никогда не бываетъ очень сильнымъ. Понятно само собою, что у мотора съ параллельнымъ возбужденіемъ пусковое сопротивленіе помѣщается лишь передъ цѣпью арматурнаго тока, и намагничивающимъ катушкамъ сразу сообщается полное напряженіе. Поэтому моторъ сразу дѣйствуетъ съ нормальной двигательной силой. Часто его включают такъ, какъ показано на схемѣ рис. 259: пуская моторъ въ ходъ, выключаютъ сопротивленіе изъ арматурной цѣпи и одновременно съ тѣмъ включают добавочное

сопротивленіе въ цѣпь намагничивающаго тока. Въ такомъ случаѣ при пускѣ магнитное поле, а слѣдовательно, и двигательная сила мотора нѣсколько больше, чѣмъ во время самаго хода. Но ясно, что и тогда увеличеніе силы не слишкомъ значительно. Во всѣхъ случаяхъ, когда необходимо, чтобы при пускѣ моторъ развивалъ особенно большую тягу, слѣдуетъ пользоваться другимъ типомъ мотора — моторомъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ.

МОТОРЪ СЪ ПОСЛѢДОВАТЕЛЬНЫМЪ ВОЗБУЖДЕНІЕМЪ.

356. Устройство мотора съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ представлено схематически на рис. 260. Арматура и магнитная обмотка образуютъ одну цѣпь. Чтобы потери напряженія и энергіи въ намагничивающихъ катушкахъ были возможно меньше, ихъ сопротивленіе должно быть мало.

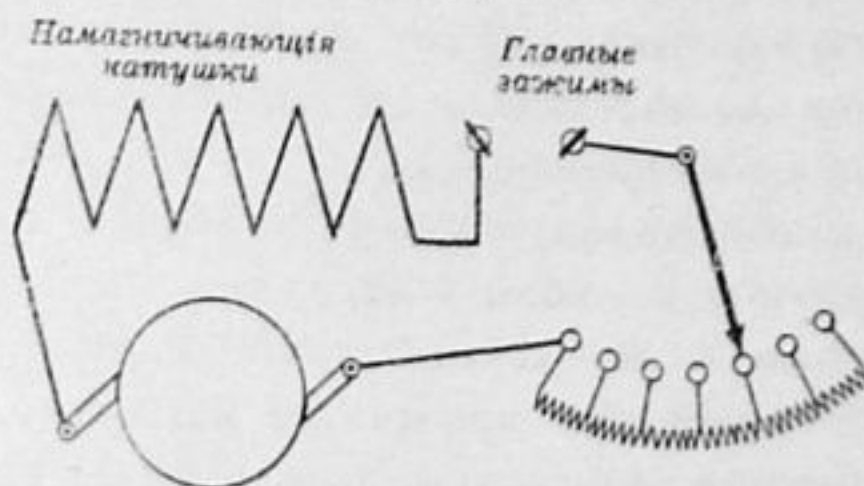


Рис. 260. Схема соединенія мотора съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ, снабженнаго пусковымъ сопротивленіемъ.

Въ моторѣ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ сопротивленіе намагничивающихъ катушекъ должно быть возможно мало, т.-е. онѣ должны состоять изъ относительно малаго числа витковъ толстой проволоки.

Небольшого числа витковъ достаточно, такъ какъ черезъ нихъ проходитъ весь арматурный токъ.

Когда къ подводимымъ зажимамъ приложено постоянное напряженіе, то при возрастаніи нагрузки происходитъ уменьшеніе скорости, влекущее за собою возрастаніе арматурнаго тока. Обратному, что имѣетъ мѣсто въ моторѣ съ параллельнымъ возбужденіемъ, въ моторѣ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ возрастаніе арматурнаго тока, являющагося одновременно и намагничивающимъ токомъ, связано съ возрастаніемъ магнитнаго поля; ясно поэтому, что возрастаніе нагрузки влечетъ за собою сильное уменьшеніе числа

оборотовъ. Но такъ какъ при возрастаніи силы тока одновременно увеличивается количество преобразуемой энергіи, т.-е. произведение изъ двигательной силы на скорость вращенія, то двигательная сила мотора съ уменьшеніемъ числа оборотовъ чрезвычайно сильно возрастаетъ; такъ какъ и магнитное поле, и якорный токъ возрастаютъ одновременно, то она возрастаетъ, приблизительно, пропорціонально J^2 . Вслѣдствіе этого моторъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ выносить весьма большія колебанія нагрузки, во всякомъ случаѣ, большія, нежели моторъ съ параллельнымъ возбужденіемъ, который при слишкомъ большой нагрузкѣ легко можетъ остановиться. Когда нагрузка убываетъ, то моторъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ вращается все быстрѣе и быстрѣе. Ненагруженный онъ развиваетъ громадную скорость, такъ какъ вслѣдствіе чрезвычайно малой силы тока магнитное поле при этомъ очень слабо. Этотъ „выбѣгъ“ мотора можетъ оказаться опаснымъ; поэтому необходимо слѣдить за тѣмъ, чтобы моторъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ никогда не пускался въ ходъ не нагруженнымъ.

Моторъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ можетъ переносить большія колебанія нагрузки, но при этомъ его число оборотовъ испытываетъ значительныя измѣненія. Сильно нагруженный онъ вращается медленно, менѣе нагруженный—быстро, ненагруженный—чрезмѣрно быстро.

Въ особенности при пускѣ въ ходъ моторъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ, при выключеніи значительнаго сопротивленія, можетъ временно развить очень большое силовое дѣйствіе. Поэтому его употребляютъ обычно въ тѣхъ случаяхъ, когда требуется сильная тяга и когда нагрузки сильно измѣняются. Для электрическихъ желѣзныхъ дорогъ, подъемныхъ машинъ, крановъ и т. д. всегда пользуются моторами съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ.

Если желательно избѣжать „выбѣга“ мотора при недостаточной нагрузкѣ, то его магнитный поставъ снабжается еще вторичной обмоткой изъ тонкой проволоки, параллельно присоединенной къ арматурной цѣпи. Въ этомъ случаѣ магнитное поле никакъ не можетъ упасть ниже определенной величины, и скорость не можетъ превысить определенный максимумъ. Въ всемъ остальномъ такой компаундъ-моторъ¹⁾, какъ называютъ этотъ типъ, промежуточный между

¹⁾ Или моторъ со смѣшаннымъ возбужденіемъ.

моторомъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ и моторомъ съ параллельнымъ возбужденіемъ, имѣеть такія же свойства, какъ и моторъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ, но менѣе рѣзко выраженные.

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННАГО ТОКА.

357. Въ электромоторѣ электродвижушія силы, индуцированныя въ якорныхъ проволокахъ, дѣйствуютъ противъ электрическаго тока. Проволоки поглощаютъ поэтому энергію отъ эѳира; онѣ испытываютъ въ магнитномъ полѣ силу, которая дѣйствуетъ въ направленіи движенія и преодолеваетъ противодѣйствіе нагрузки, вслѣдствіе чего якорь отдаетъ энергію въ видѣ работы. Если при томъ же арматурномъ токѣ вращать якорь въ обратномъ направленіи, то сила магнитнаго поля дѣйствуетъ противоположно движенію, и, чтобы поддерживать вращеніе якоря, необходимо расходовать работу. Одновременно индуцированныя электродвижушія силы дѣйствуютъ въ направленіи тока, и проволоки отдаютъ энергію эѳиру, который переноситъ ее къ другимъ частямъ проводки. Такимъ образомъ, одна и та же машина при первомъ направленіи вращенія превращаетъ электрическую энергію въ работу, при второмъ — превращаетъ работу въ электрическую энергію. Въ первомъ случаѣ машину называютъ моторомъ, во второмъ — генераторомъ. Генераторъ постоянного тока отличается отъ мотора постоянного тока не конструкціей, но лишь способомъ употребленія. Якорь генератора вращается двигателемъ, и онъ поэтому становится источникомъ электричества, доставляющимъ электрическую энергію въ соединенную съ нимъ цѣпь; наоборотъ, обмотка мотора снабжается токомъ отъ посторонняго источника, поддерживающимъ вращеніе его якоря.

Если въ качествѣ якоря генератора взять двойной Т-якорь, то онъ будетъ давать электрическія напряженія толчками подобно тому, какъ моторъ, представленный на рис. 249, толчками даетъ движеніе. Хотя эти напряженія, благодаря коммутатору, имѣють одно и то же направленіе, но отъ источника постоянного тока требуется бѣльшее. Чтобы получить непрерывное, постоянное напряженіе, нужно взять кольцевой или барабанный якорь съ коммутаторами, раздѣленными на большое число сегментовъ. Хотя и при этомъ условіи при каждомъ переходѣ щетокъ на новый сегментъ происходитъ незначительное колебаніе напряженія, но, чѣмъ больше сегментовъ заключаетъ

въ себѣ коммутаторъ, т.-е. чѣмъ больше отдѣловъ имѣеть якорная обмотка, тѣмъ менѣе замѣтны эти весьма слабыя колебанія напряженія. Такъ какъ щетки вбираютъ электрическіе заряды изъ коммутатора и уводятъ ихъ въ цѣпь, то коммутаторъ генератора называютъ также коллекторомъ или собирателемъ.

358. Особая затрудненія для изобрѣтателей представляло магнитное поле генератора. Чтобы обойтись безъ особаго источника постоянного тока для полученія намагничивающаго тока, сперва строили генераторы со стальными магнитами. Машины съ постоянными маг-

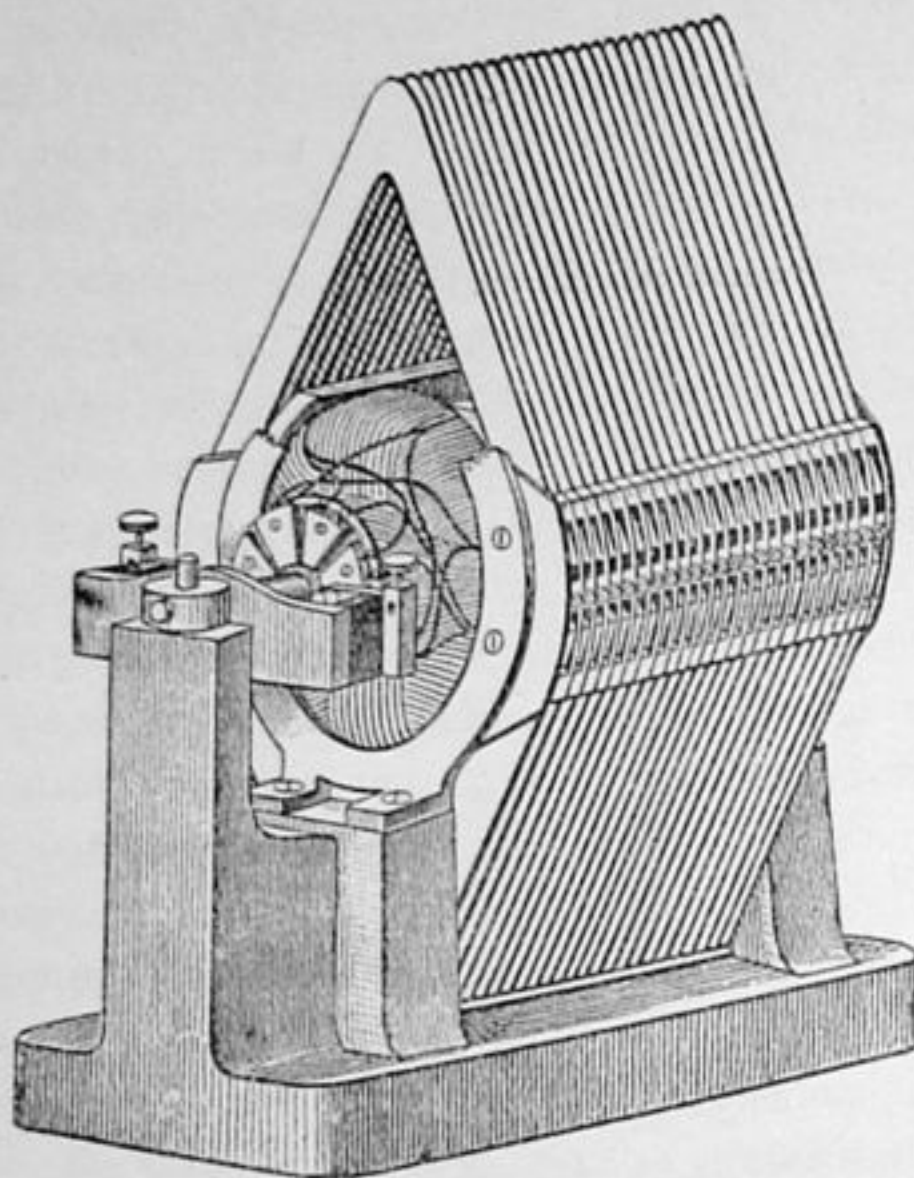


Рис. 261. Старый магнито-электрическій генераторъ постоянного тока.

нитными индукторами называются магнито-электрическими машинами. Рис. 261 представляет такой старый генераторъ съ барабаннымъ якоремъ. Магнито-электрическія машины не имѣли успѣха, такъ какъ поле постоянного стального магнита слишкомъ слабо для того, чтобы можно было съ его помощью преобразовать большія количества энергіи. Чтобы быть сколько-нибудь производительной, такая машина должна имѣть колоссальные размѣры, и потому она

не выгодна. Въ настоящее время магнито-электрическія машины применяются лишь для нѣкоторыхъ цѣлей въ технику слабыхъ токовъ, на примѣръ, для телефонныхъ вызововъ и т. п.

Въ практически пригодныхъ, мощныхъ генераторахъ постоянного тока магнитное поле возбуждается электромагнитами. Первая такая машина была построена въ 1862 году Вильде (Wilde) въ Манчестерѣ. Вильде просто соединилъ свою машину съ небольшимъ магнито-электрическимъ генераторомъ, доставляющимъ намагничивающій токъ. Такимъ образомъ онъ построилъ генераторъ съ постороннимъ (независимымъ) возбужденіемъ. Нѣсколько лѣтъ спустя, въ декабрѣ 1866 года, Вернеру Сименсу (Werner Siemens) удалось построить генераторъ, который самъ доставлялъ намагничивающій токъ. Это изобрѣтеніе самовозбуждающагося генератора положило начало развитію техники сильныхъ токовъ.

Изобрѣтеніе Сименса основывается на томъ фактѣ, что электромагнитъ машины, будучи лишь одинъ разъ возбужденъ, удерживаетъ столь значительное количество остаточнаго магнетизма, что при вращеніи якоря между щетками тотчасъ же появляется небольшое напряженіе. Посредствомъ этого напряженія получаютъ въ намагничивающихся катушкахъ токъ такого направленія, чтобы имѣющееся уже намагниченіе усиливалось. Напряженіе вслѣдствіе этого повышается, и вмѣстѣ съ тѣмъ усиливается также намагничивающій токъ; магнитное поле и напряженіе въ теченіе нѣкотораго времени взаимно усиливаютъ другъ друга, пока не будетъ достигнута опредѣленная граница, зависящая отъ сопротивленія катушекъ, числа витковъ, магнитныхъ свойствъ желѣза и вообще отъ конструкціи машины. Про-межутокъ времени, въ теченіе котораго машина возбуждается до постоянной нормальной силы поля, длится около одной минуты, самое большее нѣсколько минутъ, послѣ чего машина работаетъ съ постояннымъ напряженіемъ. Сименсъ назвалъ описанный методъ самовозбужденія динамо-принципомъ, а самовозбуждающіеся генераторы—динамомашинами. Позже названіе динамо было перенесено также и на генераторы съ постороннимъ возбужденіемъ.

Подобно моторамъ съ самовозбужденіемъ, динамо бываютъ двухъ типовъ: 1) машины съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ и 2) машины съ параллельнымъ возбужденіемъ.

ГЕНЕРАТОРЪ СЪ ПОСЛѢДОВАТЕЛЬНЫМЪ ВОЗБУЖДЕНІЕМЪ.

359. Схема включенія динамо съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ получится, если на рис. 260 мысленно удалить пусковое сопротивление.

Если генераторъ съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ приводится въ движеніе моторомъ съ приблизительно постояннымъ числомъ оборотовъ, то напряженіе генератора очень сильно измѣняется при

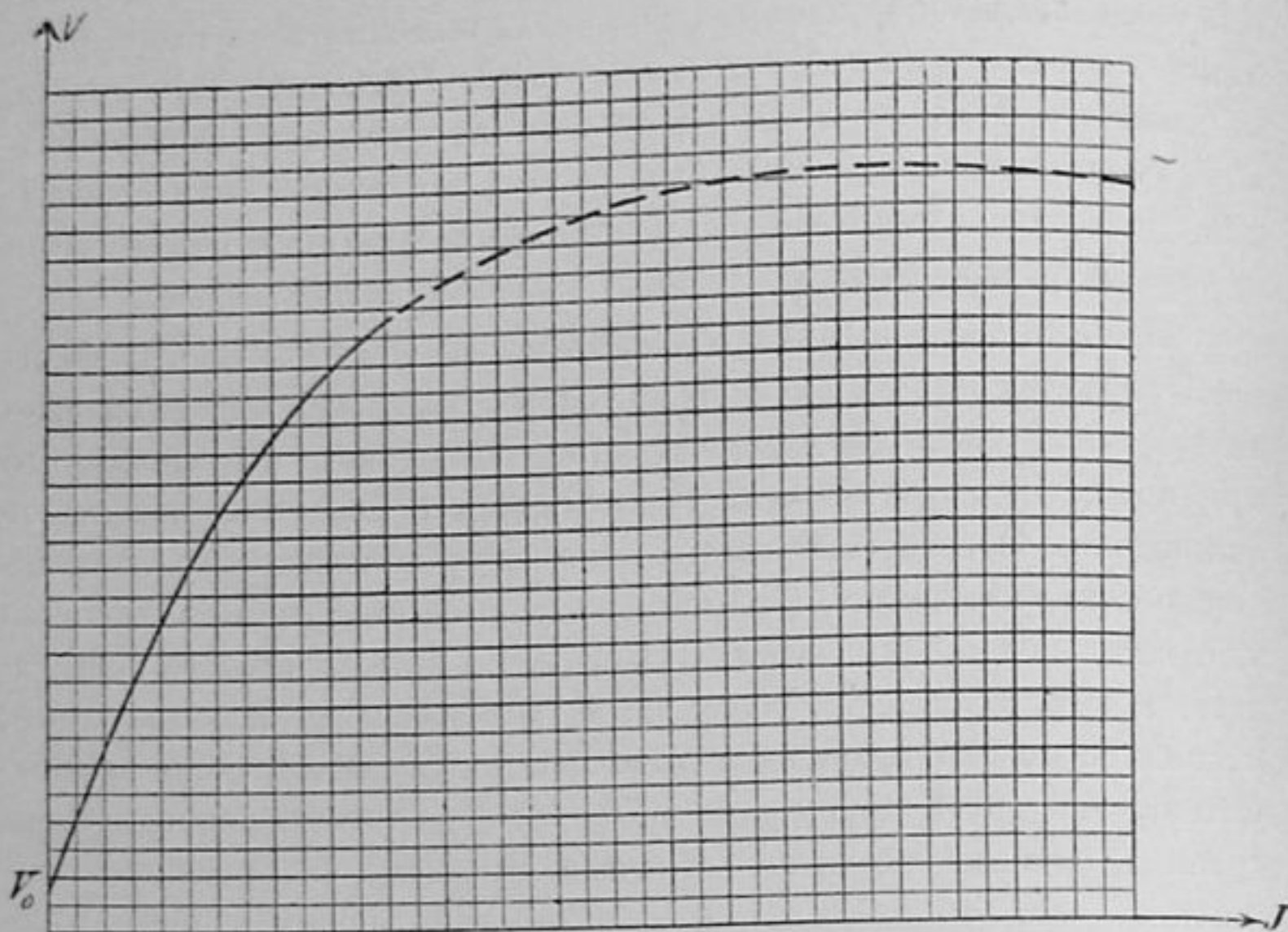


Рис. 262. Характеристика генератора съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ.

измѣненіи отнимаемой отъ него силы тока, или, какъ выражаются еще, при измѣненіи его „нагрузки“. Если пустить генераторъ вовсе безъ тока, то въ воздушной щели получается лишь слабое поле остаточнаго намагниченія; поэтому напряженіе холостого хода очень мало, почти равно нулю. Если цѣпь съ токомъ замкнуть, то магнитное поле по мѣрѣ выключенія сопротивления возрастаетъ приблизительно пропорціонально силѣ тока; слѣдовательно, и напряженіе у зажимовъ измѣняется приблизительно въ такомъ же отношеніи.

Напряженіе у зажимовъ динамо съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ измѣняется при постоянномъ числѣ оборотовъ и при экономной работѣ приблизительно пропорціонально отнимаемой силѣ тока. Лишь если дать силѣ тока возрасти настолько, что желѣзо индуктора почти достигнетъ магнитнаго насыщенія, то напряженіе у зажимовъ будетъ возрастать лишь медленно, достигнетъ максимума, а при дальнѣйшемъ возрастаніи тока будетъ даже убывать вслѣдствіе потери напряженія въ проволочной обмоткѣ машины и вслѣдствіе реакціи якоря. Кривая, представляющая зависимость напряженія у зажимовъ отъ силы тока при постоянномъ числѣ оборотовъ, такъ называемая характеристика, имѣетъ по этому для динамо съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ форму, представленную на рис. 262. При большихъ силахъ тока въ области максимума, гдѣ величина напряженія мало измѣняется въ зависимости отъ силы тока, динамо работаетъ неэкономно. На практикѣ значеніе имѣетъ лишь первая, круто поднимающаяся часть характеристики, которая на рис. 262 представлена сплошной линіей. Штрихованное продолженіе кривой имѣетъ лишь теоретическій интересъ.

Вслѣдствіе непостоянства напряженія динамо съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ можно употреблять лишь при нѣкоторыхъ совершенно особенныхъ условіяхъ. Поэтому такія динамо строятся рѣдко и только для специальныхъ цѣлей.

ГЕНЕРАТОРЪ СЪ ПАРАЛЛЕЛЬНЫМЪ ВОЗБУЖДЕНІЕМЪ.

360. Схема соединенія динамо съ параллельнымъ возбужденіемъ изображается рисункомъ 259, если на немъ мысленно удалено пусковое сопротивленіе.

Въ динамо съ параллельнымъ возбужденіемъ, какъ и въ моторѣ съ параллельнымъ возбужденіемъ, большія измѣненія силы тока и двигательной силы при почти постоянномъ числѣ оборотовъ сопровождаются лишь незначительными измѣненіями магнитнаго поля. Если отъ динамо не брать вовсе тока, то обѣ щетки все-таки будутъ замкнуты черезъ намагничивающія катушки и поэтому, согласно принципу динамо, развиваются опредѣленный намагничивающій токъ и опредѣленное постоянное напряженіе между зажимами — напряженіе холостого хода V_0 . Если присоединить внѣшнюю цѣпь, то вслѣдствіе потери напряженія въ якорѣ напряженіе у зажимовъ нѣсколько понижается; понижается, слѣдовательно, и намагничива-

ющій токъ. Кромѣ того магнитное поле нѣсколько ослабляется реакціей якоря, которая въ генераторѣ имѣетъ тотъ же знакъ, что и въ моторѣ. Слѣдствіемъ обѣихъ причинъ является то, что съ возрастаніемъ силы тока медленно убываетъ индуцированное въ якорѣ напряжение, а потому также и напряжение у зажимовъ.

Въ генераторѣ съ параллельнымъ возбужденіемъ, пока онъ работаетъ экономно, напряжение у зажимовъ измѣ-

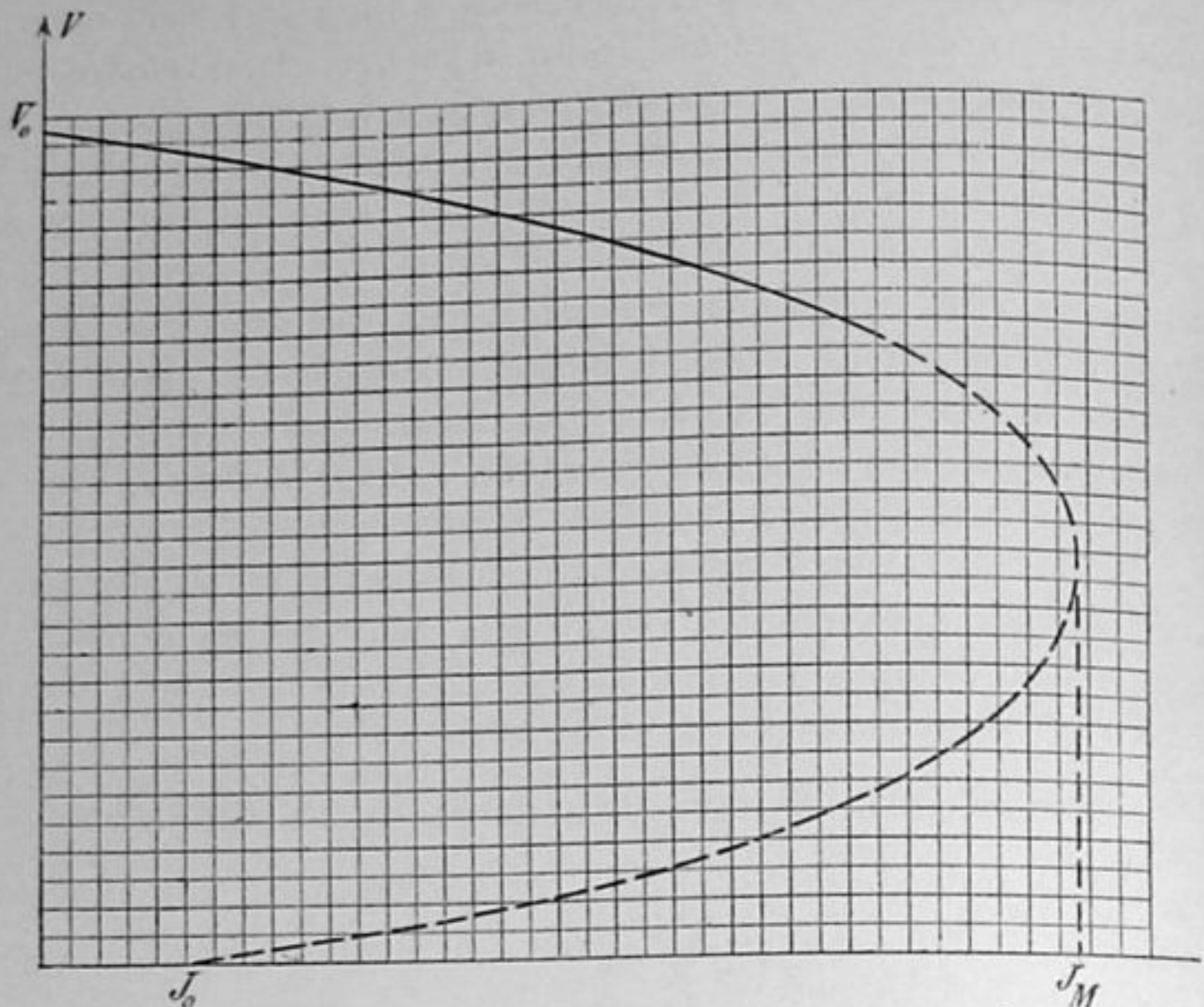


Рис. 263. Характеристика генератора съ параллельнымъ возбужденіемъ.

няется лишь незначительно, постепенно падая съ возрастаніемъ силы тока.

Динамо съ параллельнымъ возбужденіемъ (шунтовая динамомашинa) является поэтому самымъ практичнымъ и наиболѣе распространеннымъ типомъ генератора постоянного тока.

Чѣмъ меньше сопротивление внѣшней цѣпи, тѣмъ сильнѣе вредныя вліянія реакціи якоря и въ особенности омической потери напряжения. Если удалить сопротивление изъ внѣшней цѣпи,

то напряженіе у зажимовъ падаетъ и, наконецъ, столь быстро, что сила тока уже болѣе не возрастаетъ. Слѣдовательно, сила тока динамо съ параллельнымъ возбужденіемъ можетъ быть повышена лишь до опредѣленнаго максимума J_m — такъ называемой критической силы тока. Если затѣмъ продолжать еще выключать сопротивление, то напряженіе у зажимовъ понижается такъ сильно, что сила тока уменьшается. Если зажимы замкнуть коротко, чтобы виѣшнее сопротивление было безконечно мало по сравненію съ сопротивленіемъ обмотки, то напряженіе между зажимами будетъ равно нулю, намагничивающій токъ будетъ также равенъ нулю и останется лишь слабое поле остаточнаго магнетизма, индуктированное же напряженіе, какъ и токъ, будутъ весьма малы, почти равны нулю. Конечно, во всѣхъ случаяхъ, когда потеря напряженія въ якорѣ играетъ замѣтную роль, машина работаетъ весьма неэкономно, и потому прак-

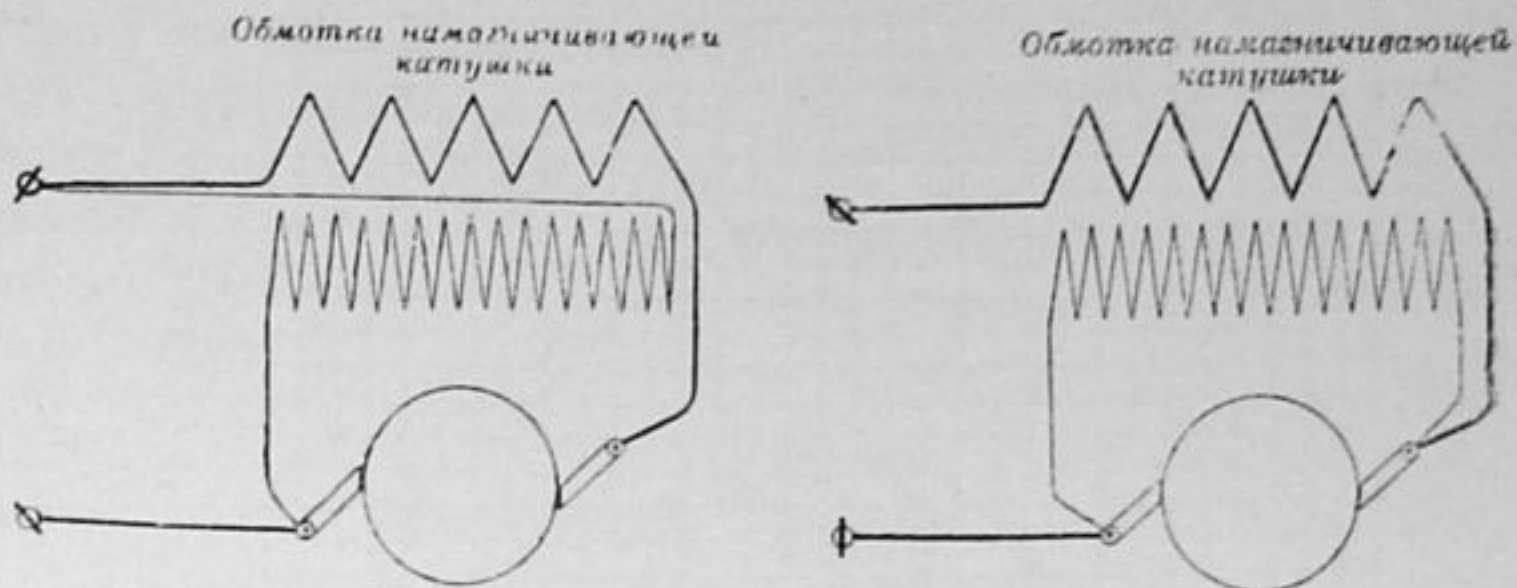


Рис. 264. Двѣ схемы компаундъ-динамо.

тически важной является лишь первая, сплошная, часть характеристики, изображенной на рис. 263; штрихованная часть имѣетъ лишь теоретическій интересъ.

Токъ динамо съ параллельнымъ возбужденіемъ не можетъ превысить опредѣленной максимальной величины — критической силы тока. При короткомъ замыканіи токъ падаетъ почти до нуля; поэтому короткое замыканіе не вредитъ машинѣ.

361. Для многихъ цѣлей желательно, чтобы напряженіе, доставляемое динамо при постоянномъ числѣ оборотовъ, по возможности не измѣнялось въ зависимости отъ силы тока, т.-е. чтобы было устранено также незначительное паденіе напряженія машины съ параллельнымъ возбужденіемъ при возрастаніи силы тока. Этого

можно достигнуть, снабжая намагничивающія катушки, кромѣ шунтовыхъ витковъ, еще и послѣдовательной обмоткой. Последняя при возрастаніи тока обуславливаетъ возрастаніе числа намагничивающихъ амперъ-витковъ, которое можно рассчитать такимъ образомъ, чтобы убыль поля вслѣдствіе реакціи якоря какъ-разъ компенсировалась. Такъ вычисленные витки, находящіеся въ послѣдовательномъ включеніи, называются компаундъ-витками, а машина — компаундъ-динамо¹⁾. Возможно двойное присоединеніе шунтовой

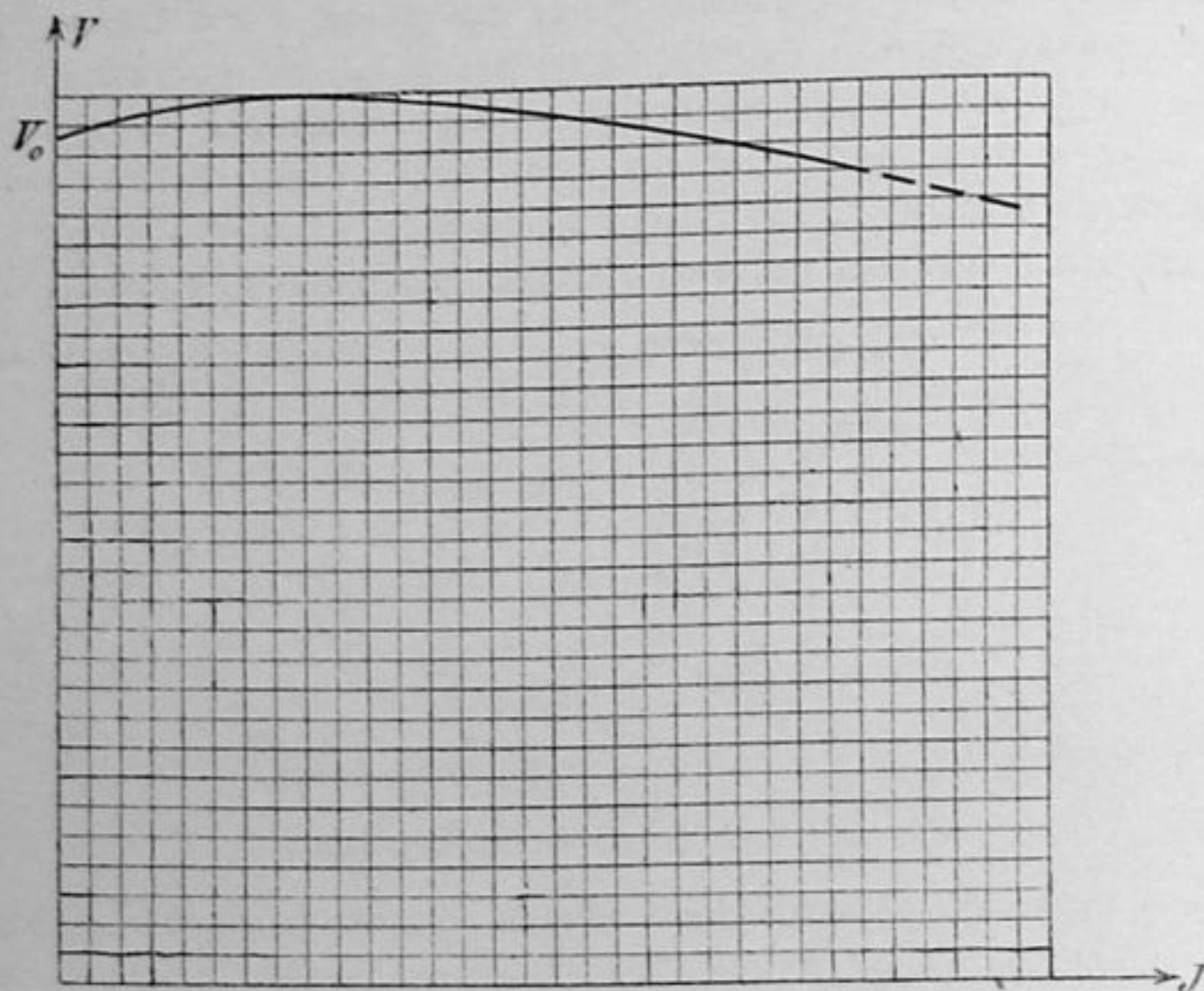


Рис. 265. Характеристика компаундъ-генератора.

обмотки: либо къ щеткамъ, либо же къ главнымъ зажимамъ машины, съ которыми соединена внѣшняя цѣпь (рис. 264). Характеристика хорошей компаундъ-машины представлена на рис. 265.

Компаундъ-машина не имѣетъ максимальной силы тока, какъ настоящая машина съ параллельнымъ возбужденіемъ. При замыканіи ея на короткую, катушки перегораютъ, если не включить предохранителя.

¹⁾ Или динамо со смѣшаннымъ возбужденіемъ.

МНОГОПОЛЮСНЫЕ МАШИНЫ.

362. Большия машины, въ особенности генераторы, часто строятся болѣе чѣмъ съ двумя магнитными полюсами. По существу многополюсныя машины представляютъ мало новаго.

На рис. 266 дана схема барабаннаго якоря многополюсной машины. Обмотка якоря представляетъ собою лишь многократное повтореніе обмотки двуполуснаго якоря. Между каждыми двумя полюсами помещается щетка; въ общемъ, слѣдовательно, щетокъ столько же, сколько полюсовъ. Щетки соединены между собой въ двѣ группы—первая съ третьей, пятой и т. д., вторая съ четвертой, шестой и т. д., такъ что части якорной обмотки включены параллельно. На большихъ машинахъ число полюсовъ доходитъ до десяти и болѣе.

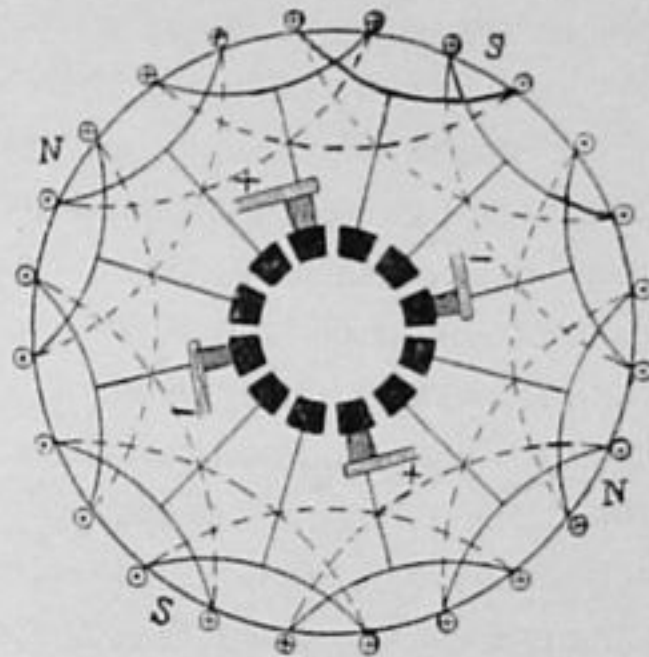


Рис. 266. Схема барабаннаго якоря четырехполюсной машины.

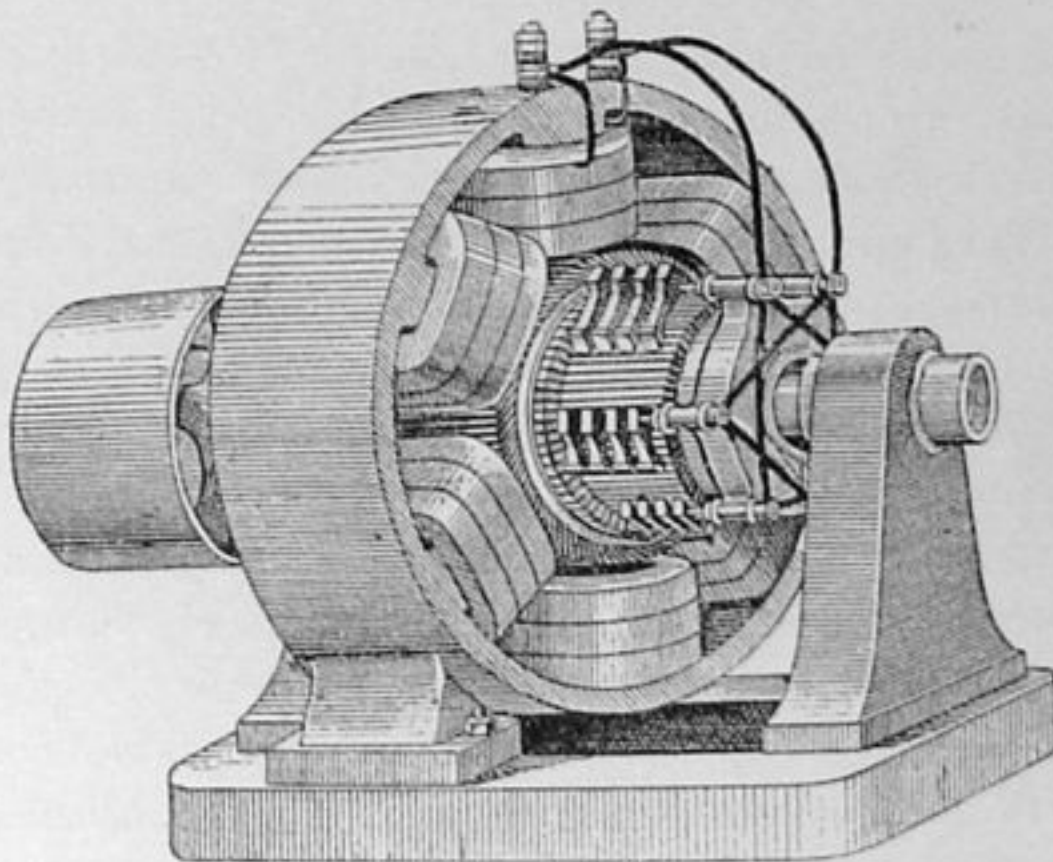


Рис. 267. Шестиполусная шунтовая динамомашина.

На рис. 267 представлена шестиполусная динамо съ параллельнымъ возбужденіемъ.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА СИЛЫ.

363. Часто приходится слышать, что вѣкъ пара уже вытѣсненъ вѣкомъ электричества. Такое утвержденіе, однако, весьма невѣрно; въ дѣйствительности, электротехника открыла для паровыхъ машинъ, какъ и для другихъ двигателей (газовыхъ моторовъ, турбинъ) новую обширную область примѣненія. Не-электрическіе двигатели, прежде всего, приводятъ количества энергіи, которыя безъ нихъ оставались бы неиспользованными, въ пригодную для употребленія форму и доставляютъ ихъ въ видѣ работы. Они являются, такъ сказать, источниками годной къ потребленію энергіи. Электрическія же машины имѣютъ совершенно другое назначеніе: онѣ служатъ, собственно, лишь мощной связью между эѳиромъ и настоящими машинами. Электрической генераторъ связываетъ эѳиръ съ какимъ-либо двигателемъ — турбиной, паровой машиной или газовымъ моторомъ, — и совершаемую имъ работу переноситъ на эѳиръ. Выходящіе изъ динамо-машины провода ограничиваютъ собой эѳирную полосу — трансмиссію, посредствомъ которой энергія переносится отъ источника силы къ мѣстамъ потребленія. Моторъ связываетъ эксплуатируемая рабочія машины съ этой эѳирной трансмиссіей.

На старыхъ фабрикахъ можно видѣть длинные трансмиссіонные валы, проходящіе по всему фабричному зданію. Съ одной стороны фабрики находится большая паровая машина — источникъ силы, на которой имѣется большой шкивъ, соединенный толстымъ ремнемъ со шкивомъ на валу. Вдоль вала размѣщены многочисленныя меньшіе шкивы; на каждомъ токарномъ станкѣ, машинѣ для сверленія или другомъ механизмѣ имѣется свой шкивъ, который можетъ быть соединенъ со шкивомъ вала посредствомъ ремня.

Въ новыхъ фабрикахъ большая ременная трансмиссіа къ источнику силы замѣнена большой динамо-машиной, трансмиссіонный валъ — идущими отъ нея двумя проводами, а малыя ременные трансмиссіи къ рабочимъ механизмамъ — небольшими электромоторами, которые часто монтируются прямо на осяхъ машинъ.

Такимъ образомъ, трансмиссіонному валу соотвѣтствуетъ полоса эѳира между двумя проводами, скорости вращенія вала — магнитное поле въ эѳирной полосѣ, упругимъ напряженіямъ въ валу, безъ которыхъ невозможенъ никакой переносъ энергіи, соотвѣтствуетъ электрическое напряженіе, потерямъ энергіи отъ тренія въ подшипникахъ и объ окружающій валъ воздухъ — потеря энергіи и напряже-

нія въ проводахъ, которые ограничиваютъ полосу ээира, переносящую энергію.

Электрическая передача энергіи и распредѣленіе силы во всѣхъ отношеніяхъ гораздо болѣе выгодны, чѣмъ передача механическая. Во-первыхъ, проводка можетъ быть повсюду простѣйшимъ образомъ введена въ тѣ мѣста, гдѣ желательно потреблять энергію, и, что особенно важно, ее можно провести на произвольно большое разстояніе, на цѣлые километры, чего невозможно достигнуть при механической трансмиссіи. Во-вторыхъ, если не пользоваться слишкомъ высокими напряжениями, то не требуется никакихъ охранительныхъ приспособленій, такъ какъ энергія переносится безъ движенія какихъ-либо вѣсомыхъ тѣлъ. Въ-третьихъ, потери энергіи при электрической передачѣ гораздо менѣе значительны, чѣмъ при механической. Въ-четвертыхъ, электрической энергіей можно также пользоваться для освѣщенія, и притомъ безопаснаго въ пожарномъ отношеніи.

ЦЕНТРАЛЬНЫЯ СТАНЦІИ ПОСТОЯННАГО ТОКА.

364. Самымъ замѣчательнымъ свойствомъ электрической передачи энергіи является то, что разстоянія и прочія мѣстныя условія не играютъ для нея почти никакой роли.

Поэтому благодаря электротехникѣ стала возможной необыкновенная централизація источниковъ силы. Мелкія механическія мастерскія требовали прежде множества отдѣльныхъ малыхъ источниковъ силы (небольшихъ паровыхъ машинъ и т. п.). Эти небольшіе двигатели совершенно вытѣснены изъ употребленія электротехникой, такъ какъ они работаютъ весьма неэкономно. Вмѣсто этого сильно-развилась постройка большихъ двигателей, которые работаютъ гораздо болѣе экономно, чѣмъ малые. Многочисленныя мелкія фабрики, на примѣръ, всѣ фабрики одного города, могутъ снабжаться необходимой энергіей и вмѣстѣ съ тѣмъ свѣтомъ отъ одной единственной центральной станціи. Возможны двѣ существенно различныя системы такого снабженія силой: постоянный токъ и переменный токъ. До сихъ поръ мы говорили только о постоянномъ токѣ; переменнымъ токомъ мы займемся въ слѣдующей главѣ. Мы увидимъ (§ 378), что онъ представляетъ особыя удобства при передачѣ энергіи изъ одной центральной станціи на весьма большія разстоянія, на примѣръ, во всѣ города цѣлой провинціи. При малыхъ же

разстояніяхъ, напримѣръ, при постройкѣ центральной станціи для одного города, чаще всего пользуются постояннымъ токомъ.

Система постоянного тока имѣетъ то большое преимущество, что она легко допускаетъ сильныя временныя колебанія въ потребленіи энергіи. Какъ показываетъ опытъ, въ городахъ потребленіе энергіи различно въ различное время дня; вообще говоря, оно рѣзко повышается вечеромъ, когда зажигаются лампы, и падаетъ днемъ, когда лампы тушатся. Было бы, конечно, неэкономно днемъ и ночью пускать въ ходъ динамо-машину, чтобы поддерживать провода сѣти при предписанномъ постоянномъ напряженіи, такъ какъ большую часть времени машина работала бы съ нагрузкой, гораздо меньшей, чѣмъ нормальная, а въ теченіе нѣкоторыхъ промежутковъ времени была бы перегружена. Экономно же она работаетъ, какъ мы знаемъ, лишь при силѣ тока, близкой къ нормальной. Въ случаѣ постоянного тока можно между источникомъ силы и сѣтью включить батарею аккумуляторовъ въ качествѣ эластичнаго резервуара энергіи. Токъ отъ аккумуляторной батареи можетъ колебаться въ весьма широкихъ предѣлахъ безъ существеннаго измѣненія полезной работы батареи. Поэтому на центральной станціи постоянного тока всегда имѣется кромѣ одного или нѣсколькихъ генераторовъ еще большая батарея аккумуляторовъ, при чемъ провода, идущіе на разстояніе, соединяются съ полюсами этой батареи. Машины служатъ прежде всего для заряженія батареи. Поэтому онѣ не должны находиться въ ходу весь день, но лишь столько, сколько необходимо, чтобы каждый разъ заряжать батарею, для чего требуется постоянный токъ. Кромѣ того машины пускаются въ ходъ еще тогда, когда потребленіе тока въ городѣ настолько велико, что аккумуляторы могутъ получить поврежденіе. Машины включаются параллельно батарее, такъ что часть потребляемаго тока доставляется машинами, а другая часть батареей.

Напряженіе сѣти обыкновенно бываетъ кратнымъ 55-ти вольтъ, потому что таково напряженіе обычной дуговой лампы. Если напряженіе равно 110 вольтамъ, то желающій пользоваться дуговой лампой долженъ включить двѣ лампы послѣдовательно; иначе ему придется устранить 55 вольтъ добавочнымъ сопротивленіемъ, и онъ будетъ имѣть одну лампу съ такимъ же расходомъ энергіи, котораго было бы достаточно для двухъ лампъ. Если напряженіе равно 220 вольтамъ, то для избѣжанія потери нужно включать послѣдовательно по четыре дуговья лампы.

Такъ какъ напряжение аккумуляторовъ не постоянно, то на центральной станціи долженъ находиться особый для нихъ распределитель, съ помощью котораго всегда можно включить между проводами, идущими на разстояние, столько аккумуляторовъ, сколько необходимо, чтобы сътъ имѣла какъ-разъ правильное напряжение (рис. 268).

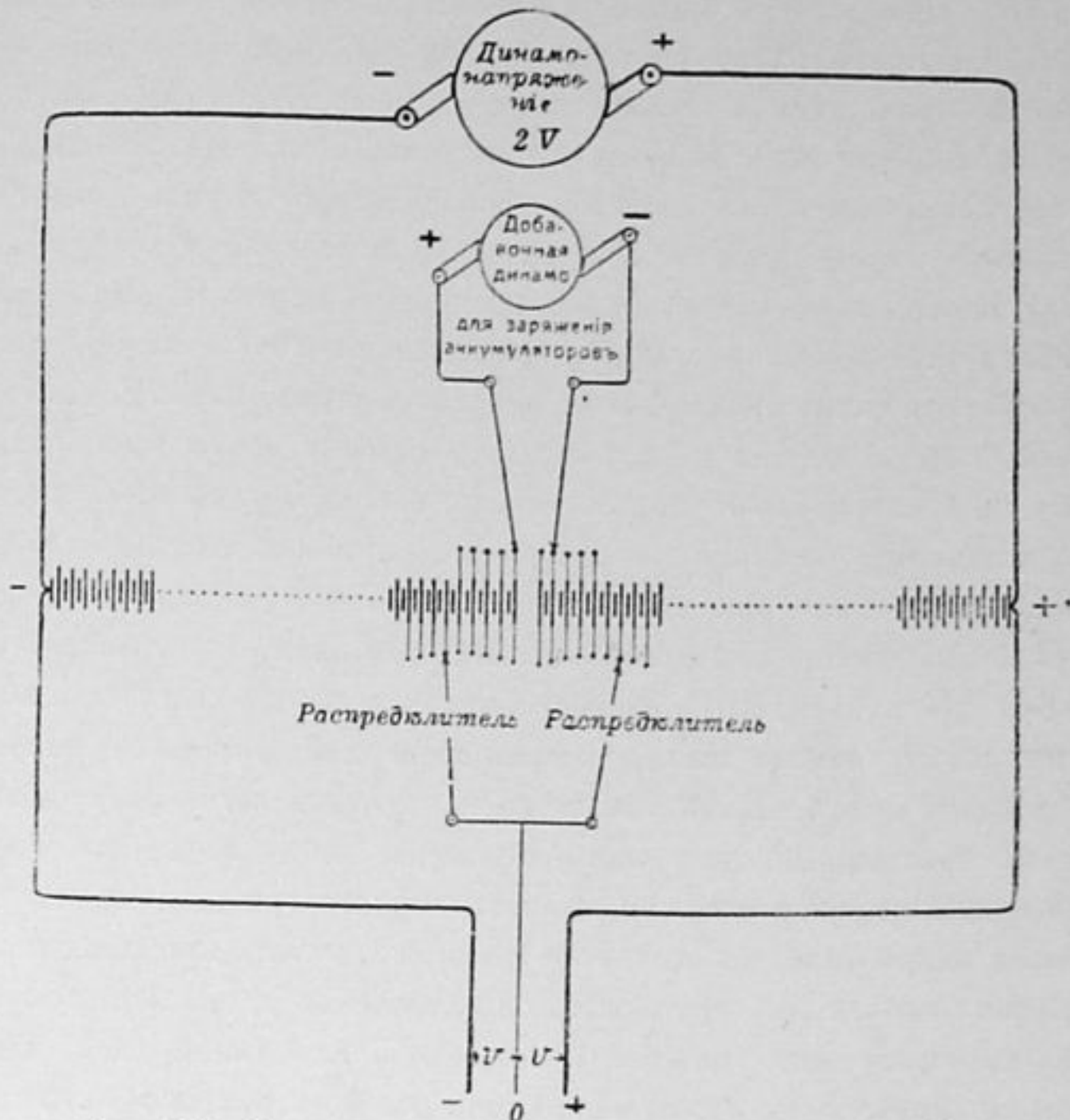


Рис. 268. Схема соединения при трехпроводной системѣ.

Если сътъ обслуживаетъ болѣе или менѣе значительную область (напримѣръ, городъ), то всю эту область дѣлятъ на участки, каждый изъ которыхъ обслуживается токомъ изъ определеннаго питательнаго пункта¹⁾. Къ каждой подстанціи ведетъ особая толстая проводка, и каждая подстанція имѣетъ свой распределитель, при помощи ко-

¹⁾ Въмѣсто этого термина (Speisepunkt) мы будемъ пользоваться терминомъ подстанція.

уголь, описанный за время t . Уголь $2\pi t$ называют фазой колебания. Фазу часто выражают не в дуговой мѣрѣ, но в градусах ($\frac{\pi}{2} = 90^\circ$, $\frac{\pi}{4} = 45^\circ$ и т. д.). На рис. 269, кромѣ часовой диаграммы, представлена еще кривая, изображающая зависимость величины поля x отъ времени t . Колебание, происходящее по представляемому кривой простому закону, называют синусоидальнымъ или простымъ колебаниемъ. Если представить себѣ, что стрѣлка диаграммы вращается съ переменнѣй скоростью, но такъ, что при каждомъ новомъ оборотѣ скорость проходитъ черезъ тѣ же значенія, то въ проекціи получатся правильныя колебания, слѣдующія иному закону. Такія колебания, согласно математической теоремѣ Фурье (Fourier), могутъ быть всегда представлены какъ результатъ сложения многихъ синусоидальныхъ колебаний съ числомъ періодовъ $n, 2n, 3n, 4n, \dots$ (основное колебание и верхнія добавочныя колебания), почему ихъ и называютъ сложными колебаниями. При объясненіи явленій переменнаго тока мы будемъ часто предполагать, что имѣемъ дѣло лишь съ простыми синусоидальными колебаниями. Даже въ тѣхъ случаяхъ, когда это предположеніе не вполне соответствуетъ дѣйствительности, упрощенная теорія въ существенномъ правильно воспроизводитъ факты, и лишь при количественныхъ изслѣдованіяхъ представляется необходимость въ болѣе точномъ вычисленіи.

Когда нѣсколько переменныхъ полей одинаковаго рода налагаются одно на другое, то сложение ихъ совершается по принципу наложения, и если всѣ они имѣютъ одно

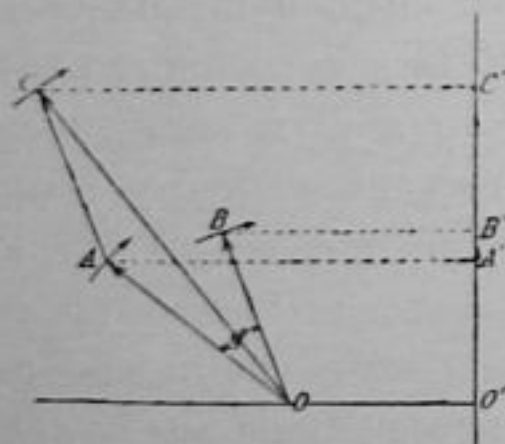


Рис. 270. Сложение двухъ переменныхъ полей.

и то же число періодовъ n , то въ результатѣ сложения получается одно переменное поле того же періода. Такъ какъ въ физикѣ ээира всѣ величины, характеризующія состояніе, представляются векторами, то мы должны строго различать два случая: 1) слагающіяся поля направлены параллельно; 2) направления слагающихся полей образуютъ нѣкоторый уголь. Разсмотримъ послѣдовательно оба случая. Сперва мы рассмотримъ сложение параллельно направленныхъ переменныхъ полей. Этотъ случай имѣетъ мѣсто, на примѣръ, когда нѣсколько генераторовъ пере-

мѣннаго тока съ одинаковымъ числомъ періодовъ одновременно снабжаютъ токомъ одну проводку. Поля тока слагаются въ этомъ случаѣ, какъ алгебраическія величины. Положимъ, что два поля представлены на часовой діаграммѣ (рис. 270) вращающимися отрѣзками OA и OB , образующими уголъ φ , равный разности фазъ двухъ соответственныхъ колебаній. Результирующее поле получается въ этомъ случаѣ, если отъ конца A' проекціи $O'A'$ отложить отрѣзокъ $A'C' = O'B'$; $O'C'$ и есть искомая величина. Очевидно, что $O'C'$ представляетъ собою проекцію отрѣзка OC , который получается изъ векторовъ OA и OB по правилу сложения векторовъ. Это справедливо для всякой фазы колебанія.

Сложение двухъ параллельно направленныхъ переменныхъ полей съ одинаковымъ числомъ періодовъ можно произвести графически при помощи часовой діаграммы; для этого слѣдуетъ обѣ стрѣлки, представляющія два складываемыя переменныя поля, сложить, какъ два вектора.

Благодаря этому свойству, часовая діаграмма часто называется также „діаграммой векторовъ“.

Средняя энергія результирующаго переменнаго поля, вообще, не равняется суммѣ среднихъ энергій обоихъ слагаемыхъ полей. Въ простѣйшемъ случаѣ, когда оба поля имѣютъ одну и ту же амплитуду, получается слѣдующее: 1) если разность фазъ полей равняется нулю, то амплитуда удваивается, энергія же, пропорціональная квадрату силы поля, увеличивается вчетверо; 2) если разность фазъ равна 90° , то квадратъ результирующей амплитуды равенъ суммѣ квадратовъ слагаемыхъ амплитудъ, и энергія результирующаго поля равняется суммѣ энергій слагаемыхъ полей; 3) если разность фазъ равна 180° , то результирующая амплитуда равняется нулю, и энергія также равна нулю. Явленія, основывающіяся на томъ, что сумма двухъ колебаній зависитъ отъ разности ихъ фазъ, называются интерференціонными явленіями, и поэтому принято говорить, что при наложеніи двухъ переменныхъ полей происходитъ ихъ интерференція.

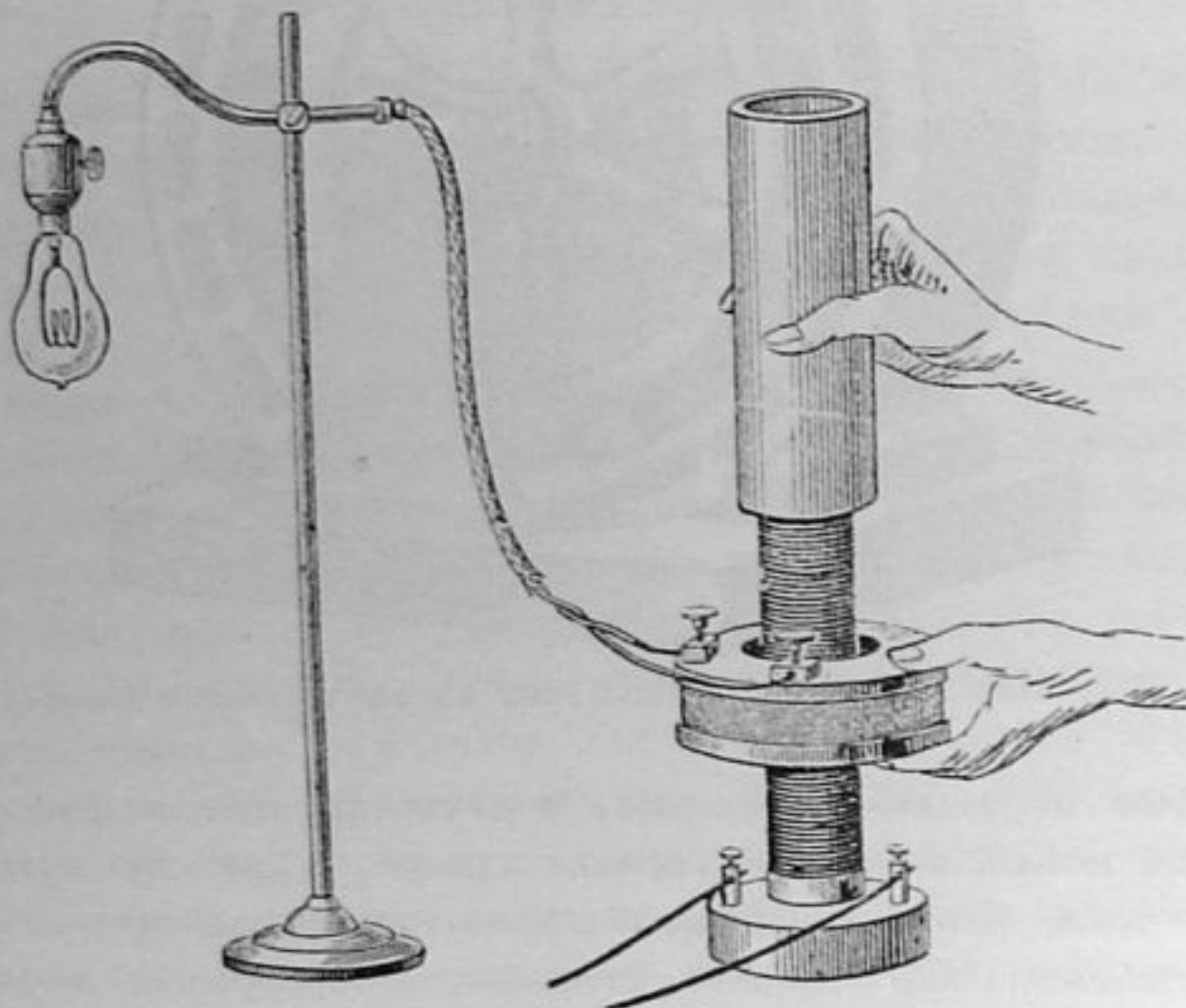
ИЗМѢРЕНІЯ ПЕРЕМѢННЫХЪ ПОЛЕЙ.

368. Инструменты, въ которыхъ сила, дѣйствующая на подвижную систему, пропорціональна измѣряемой величинѣ, характеризующей поле (электрометръ съ заряженнымъ индикаторомъ, гальвано-

Генераторы переменнаго тока, примѣняемые въ Европѣ въ техникѣ сильныхъ токовъ, имѣютъ при нормальномъ числѣ оборотовъ обыкновенно 50 періодовъ въ секунду. Такимъ образомъ, продолжительность колебанія обыкновеннаго переменнаго тока равна 0.02 секунды. Въ послѣднее время въ особыхъ случаяхъ берутъ также и меньшія числа періодовъ, напримѣръ, 25 въ секунду. Въ Сѣверной Америкѣ употребительны нѣсколько большія числа періодовъ, соответствующія меньшей продолжительности колебаній.

ИНДУКТИРОВАННЫЯ НАПРЯЖЕНІЯ ВЪ ПЕРЕМѢННОМЪ МАГНИТНОМЪ ПОЛѢ.

370. Переменное магнитное поле невозможно безъ дѣйствія электрическихъ напряженій, приводящихъ магнитное поле въ состо-



Переменный токъ

Рис. 273. Индукціонныя дѣйствія въ переменномъ магнитномъ полѣ.

яніе покоя и вновь его возбуждающихъ. Эти напряжения могутъ быть очень сильными, если въ магнитномъ полѣ находится желѣзо,

т.-е. тѣло съ большой проникаемостью, въ которомъ удѣльная инерція ээира весьма сильно увеличена благодаря содѣйствию молекулярныхъ магнитовъ. Желѣзо дѣйствуетъ подобно тому, какъ тяжелое маховое колесо дѣйствуетъ на валъ, который при помощи рукоятки вращаютъ правильно періодически въ ту и въ другую сторону. Движеніе маховаго колеса вызываетъ въ валѣ высокія переменныя упругія напряжения.

Если пропускать переменный токъ черезъ катушку, имѣющую внутри себя сердечникъ изъ мягкаго желѣза, который во избѣжаніе вихревыхъ токовъ долженъ быть составленъ изъ полосъ или изъ изолированныхъ желѣзныхъ проволокъ, то упомянутыя электрическія напряжения проявляются въ формѣ приблизительно круговыхъ силовыхъ линий, обвивающихъ желѣзный сердечникъ. Можно легко обнаружить эти напряжения, если на катушку съ сердечникомъ надвинуть болѣе широкую катушку, концы которой соединены съ лампой накаливанія. Если эта вторичная катушка имѣетъ достаточное число оборотовъ, то подъ дѣйствіемъ индуктированныхъ напряженій лампа накаливанія вспыхиваетъ яркимъ свѣтомъ.

Можно, по крайней мѣрѣ отчасти, воспрепятствовать образованію измѣняющихся магнитное поле напряженій, если надвинуть на электромагнитъ переменнаго тока металлическій цилиндръ съ не очень тонкими стѣнками (рис. 273). Лампа накаливанія, присоединенная къ вторичной катушкѣ, тухнетъ, какъ только мы достаточно низко надвинемъ этотъ цилиндръ. Дѣло въ томъ, что въ металлическомъ цилиндрѣ напряжения весьма быстро распадаются, и, благодаря его присутствію, кругомъ не можетъ образоваться электрическое поле. Если мы обратимся къ нашей прежней механической аналогіи съ маховымъ колесомъ, то явленіе происходитъ такимъ образомъ, какъ если бы колесо было не прочно скрѣплено съ осью, но между нимъ и осью находился скользящій слой. Въ такомъ случаѣ колесо лишь отчасти слѣдовало бы за осью въ ея движеніяхъ въ ту и другую сторону, и упругія напряжения оси были бы лишь незначительны. Тяжелому маховому колесу соотвѣтствуетъ желѣзный сердечникъ, скользящему слою — металлическій цилиндръ, оси — изолирующее окружающее пространство. Конечно, металлическій цилиндръ одновременно въ значительной степени препятствуетъ образованію какъ напряженій, такъ и магнитнаго поля, измѣненіе котораго безъ этихъ напряженій невозможно; индуктированныя въ металлическомъ

цилиндръ токи, соответствующіе распаду электродинамическаго поля, направлены противоположно токамъ намагничивающей катушки и потому уменьшаютъ число амперъ-витковъ поля, хотя при надвиганіи цилиндра токъ въ катушкѣ не только не убываетъ, но, наоборотъ, даже нѣсколько возрастаетъ, какъ легко убѣдиться при помощи амперметра переменнаго тока. Металлическій цилиндръ, надѣтый на намагничивающую катушку, дѣйствуетъ до нѣкоторой степени такъ, какъ будто его присутствіе при переменныхъ токахъ понижало проницаемость желѣзнаго сердечника или какъ если бы онъ самъ былъ діаманитенъ. Дѣйствительно, какъ мы видѣли въ § 326, истинный діаманитизмъ тоже, вѣроятно, объясняется малыми круговыми токами, индуцированными въ молекулахъ.

371. Подобно тому, какъ при вращеніи оси съ маховымъ колесомъ въ ту и другую сторону движущія силы должны преодолѣть

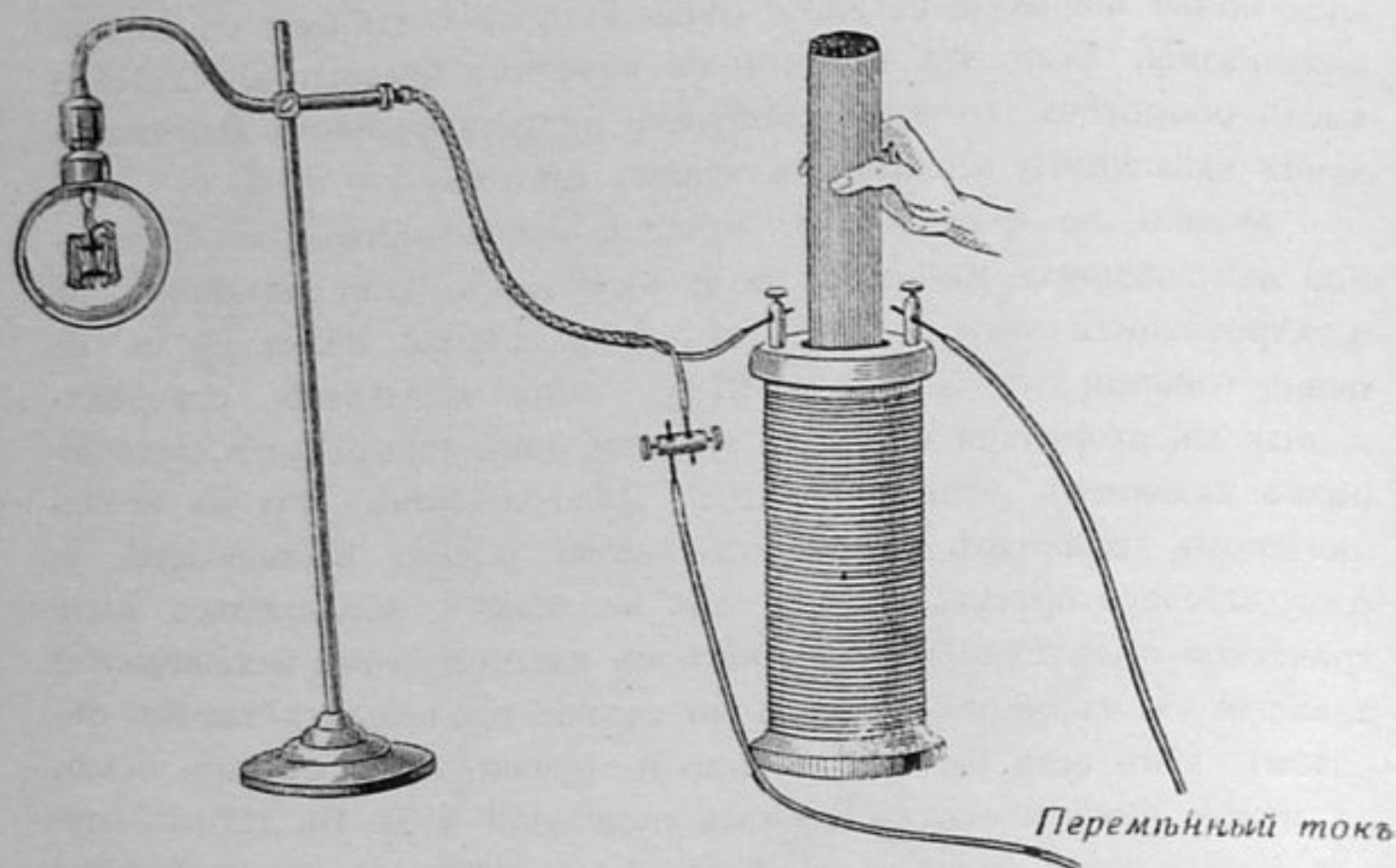


Рис. 274. Индуктивное сопротивление.

инерцію колеса, точно такъ же для существованія магнитнаго переменнаго поля напряженіе генератора переменнаго тока должно преодолѣть индуцированныя напряжения, представляющія собою ни что иное, какъ дѣйствія инерціи магнитнаго поля. Если мы сообщимъ полю бѣольшую инерцію (напримѣръ, вводя въ него желѣзныя массы),

то при томъ же переменномъ напряженіи будетъ развиваться меньшая сила тока, подобно тому какъ вращающееся въ ту и другую сторону маховое колесо при одной и той же движущей періодической силѣ получаетъ тѣмъ меньшя отклоненіе и угловую скорость, чѣмъ больше его моментъ инерціи. Можно легко демонстрировать понижающее токъ дѣйствіе самоиндукціи, если соединить лампу накаливанія съ источникомъ переменнаго тока и ввести въ цѣпь длинную катушку. Ярко горящую лампу можно довести до потуханія, ничего не измѣняя въ проводкѣ, а только вводя въ катушку пластинчатый желѣзный сердечникъ (рис. 274).

Такимъ образомъ, включеніе самоиндукціи въ цѣпь переменнаго тока дѣйствуетъ подобно включенію сопротивленія. Переменный токъ не можетъ достигнуть большой силы даже при омическомъ сопротивленіи цѣпи, близкомъ къ нулю, если въ цѣпи находится большая самоиндукція. Кажущееся сопротивленіе самоиндукціонной катушки переменному току, называемое иногда также индуктивнымъ сопротивленіемъ, тѣмъ больше, 1) чѣмъ больше „магнитная инерція“, т.-е. коэффициентъ самоиндукціи катушки, и 2) чѣмъ больше періодовъ въ секунду имѣетъ переменный токъ. Болѣе точное вычисленіе даетъ слѣдующее:

Если коэффициентъ самоиндукціи катушки равенъ L генри и число періодовъ переменнаго тока въ секунду равно n , то индуктивное сопротивленіе катушки переменному току при синусоидальныхъ колебаніяхъ R_i равняется $2\pi n L$ омамъ. Если омическое сопротивленіе катушки безконечно мало по сравненію съ индуктивнымъ сопротивленіемъ R_i и эффективное напряженіе между зажимами катушки равняется V_{eff} , а эффективная сила тока равняется J_{eff} , то имѣетъ мѣсто соотношеніе: $V_{eff} = 2\pi n L \cdot J_{eff}$.

Однако, аналогія между ослабляющимъ токъ дѣйствіемъ самоиндукціи и дѣйствіемъ истиннаго сопротивленія лишь весьма поверхностная. Тогда какъ напряженіе между концами сопротивленія въ каждый моментъ, по закону Ома, пропорціонально силѣ тока, такъ что сила тока и напряженіе всегда имѣютъ одинаковыя фазы, напряженіе между зажимами самоиндукціонной катушки всегда идетъ впереди силы тока, которую оно вызываетъ лишь съ преодоленіемъ магнитной инерціи. Пока напряженіе дѣйствуетъ въ одну сторону, оно вызываетъ возрастаніе магнитнаго поля въ постоянномъ направленіи,

и магнитное поле достигаетъ максимума, лишь когда напряженіе становится равнымъ нулю. Когда же напряженіе мѣняетъ знакъ, то и измененіе магнитнаго поля также мѣняетъ знакъ. Образовавшееся ранѣе поле сперва уменьшается, и за первую часть новаго полуперіода оно понижается до нуля, а въ теченіе второй части оно развивается въ противоположномъ направленіи и возрастаетъ до новаго максимума, когда напряженіе снова становится равнымъ нулю, и такъ далѣе. Напряженіе всегда идетъ впереди вызываемаго имъ переменнаго магнитнаго поля на четверть періода, и потому напряженіе между конечными зажимами самоиндукціонной катушки, свободной отъ сопротивленія, и сила тока имѣютъ разность фазъ $\frac{\pi}{2}$ или 90° . Эту разность фазъ легко демонстри-

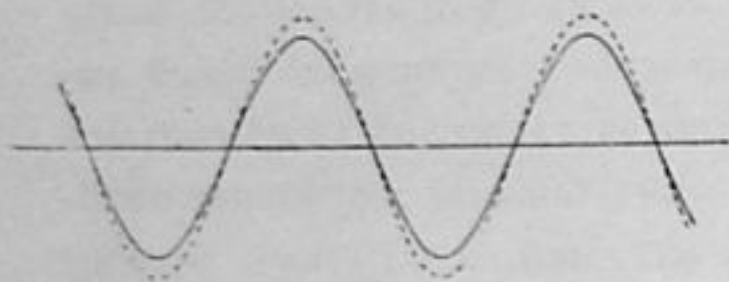


Рис. 275. Осциллограмма напряжения и силы тока въ сопротивленіи.

— Кривая силы тока.
 Кривая напряжения между конечными зажимами сопротивленія.

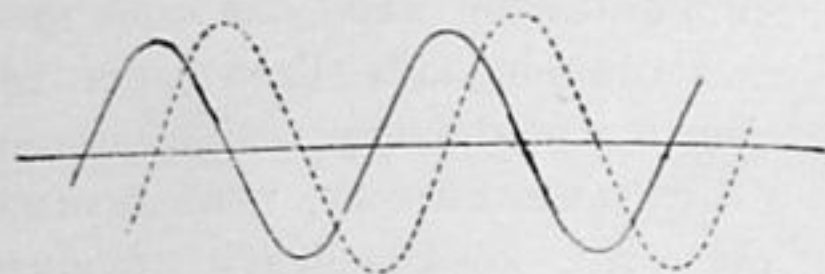


Рис. 276. Осциллограмма напряжения и силы тока въ самоиндукціонной катушкѣ.

— Кривая силы тока.
 Кривая напряжения между конечными зажимами самоиндукціонной катушки.

ровать, напримѣръ, при помощи двойныхъ осциллограммъ (§ 286), представленныхъ на рис. 275 и 276.

Совершенно такую же разность фазъ мы можемъ обнаружить и въ нашей механической модели — маховомъ колесѣ на валу — между силою и движеніемъ, если правильно и періодически вращать валъ при помощи рукоятки въ ту и въ другую сторону. Маховое колесо достигаетъ максимальной скорости лишь тогда, когда сила дѣлается равной нулю, чтобы затѣмъ переменить свой знакъ.

Мы найдемъ теперь связь между напряженіемъ и силой тока для случая простаго синусоидальнаго колебанія, когда въ цѣпь переменнаго тока, кромѣ самоиндукціи, введено еще истинное сопротивленіе, включенное между зажимами, между которыми измѣряется напряженіе; таковъ, напримѣръ, случай, когда истинное сопротивленіе проволоки самоиндукціонной катушки не безконечно мало.

Удобнѣе всего для этой цѣли воспользоваться часовой діаграммой. Пусть на рис. 277 стрѣлка $OA = J_M$ представляетъ силу тока J ; напряжение, уравнивающее омическое сопротивление R , представлено стрѣлкой OB , совпадающей по направленію съ OA и равной $J_M \cdot R$; напряжение, соответствующее самоиндукціи L и имѣющее разность фазъ въ 90° относительно J , представлено стрѣлкой OC , перпендикулярной къ OA и равной $2\pi nL \cdot J_M$. Если мы сложимъ OB и OC по правилу сложения векторовъ, то получимъ стрѣлку OD , представляющую полное напряжение V между зажимами; длина этой стрѣлки OD равняется V_M , а уголъ $DOA = \varphi$ представляетъ разность фазъ между V и J . Для вычисленія этой разности фазъ имѣемъ непосредственно изъ чертежа:

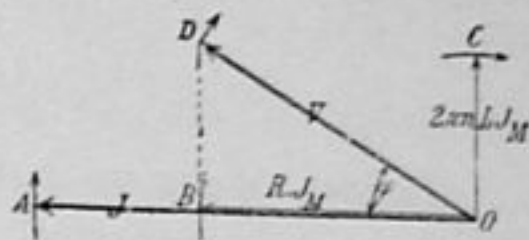


Рис. 277. Часовая діаграмма соединеннаго дѣйствія сопротивления и самоиндукціи.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{OC}{OB} = \frac{2\pi nL}{R}$$

и

$$V_M = \sqrt{OC^2 + OB^2} = J_M \cdot \sqrt{R^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}.$$

Слѣдовательно,

$$V_{\text{eff}} = J_{\text{eff}} \cdot \sqrt{R^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}.$$

Кажущееся сопротивление R_s между обоими зажимами равняется $\sqrt{R^2 + 4\pi^2 n^2 L^2}$. Найденныя формулы имѣютъ силу какъ въ томъ случаѣ, когда сопротивление R и самоиндукція L включены послѣдовательно, такъ и въ томъ случаѣ, когда одна катушка одновременно обладаетъ сопротивленіемъ R и самоиндукціей L .

ЭНЕРГІЯ, ПЕРЕНОСИМАЯ ПЕРЕМѢННЫМЪ ТОКОМЪ.

372. Если V и J суть величины напряженія и силы тока въ данный моментъ, т.-е. полныя величины электрическаго и магнитнаго полей на подводящихъ токъ зажимахъ аппарата, питаемаго переменнымъ токомъ, то энергія, переносимая эфиромъ, имѣетъ въ данный моментъ величину

$$U = V \cdot J \text{ ваттъ.}$$

Если разность фазъ величинъ V и J равняется нулю, то при синусоидальныхъ колебаніяхъ

$$U = V_M \cdot J_M \cdot \sin^2 2\pi nt.$$

Такъ какъ среднее значеніе $\sin^2 2\pi nt$ равняется $\frac{1}{2}$, то среднее значеніе U , т.-е. количество энергіи, переносимое за одну секунду, \bar{U} равняется $\frac{1}{2} V_M \cdot J_M$, или, согласно § 368,

$$\bar{U} = V_{eff} \cdot J_{eff} \text{ ваттъ.}$$

Такимъ образомъ вычисляется, напримѣръ, средняя энергія, поглощаемая электрической лампой накаливанія, питаемой переменнымъ токомъ. Если же разность фазъ между J и V равна 90° , какъ въ случаѣ самоиндукціонной катушки безъ замѣтнаго омическаго сопротивленія, т.-е. если $J = J_M \cdot \sin 2\pi nt$, $V = V_M \cdot \cos 2\pi nt$, то энергія, поступающая между зажимами въ данный моментъ, равняется

$$U = V_M \cdot J_M \cdot \cos 2\pi nt \cdot \sin 2\pi nt.$$

Но $\sin 2\pi nt \cdot \cos 2\pi nt = \frac{1}{2} \cdot \sin 4\pi nt$, и среднее значеніе этой величины равняется нулю; слѣдовательно,

$$\bar{U} = 0.$$

Итакъ, хотя значеніе U въ каждый моментъ отлично отъ нуля, однако, за время цѣлаго колебанія между зажимами вовсе не проходитъ энергіи. Это нужно понимать такъ: энергія въ данный моментъ то входитъ въ аппаратъ (самоиндукціонную катушку), то выходитъ изъ него обратно въ провода. Въ теченіе первой четверти періода отъ $t = 0$ до $2\pi nt = \frac{\pi}{2}$ (т.-е. до $t = \frac{T}{4}$, гдѣ T —продолжительность одного колебанія) сила тока возрастаетъ отъ 0 до J_M , напряженіе же падаетъ отъ V_M до 0; входящая энергія въ теченіе этого времени положительна, и самоиндукціонная катушка поэтому получаетъ энергію сперва медленно, затѣмъ быстрѣе и, наконецъ, опять медленно; эта энергія служитъ для образованія сильнаго магнитнаго поля. Въ теченіе второй четверти періода отъ $2\pi nt = \frac{\pi}{2}$ до $2\pi nt = \pi$ (т.-е. отъ $t = \frac{T}{4}$ до $t = \frac{T}{2}$) V мѣняетъ свой знакъ, измѣняясь отъ 0 до $-V_M$, и въ то же время значеніе J падаетъ отъ J_M до 0, и энергія отрицательна, т.-е. самоиндукціонная катушка отдаетъ обратно энергію, полученную за первую четверть періода, сначала медленно, затѣмъ быстрѣе, наконецъ, опять медленно. Конечно, въ теченіе

второй четверти періода изъ катушки уходитъ то же количество энергіи, которое было ей сообщено въ теченіе первой четверти періода. Такимъ образомъ, за первую половину періода энергія вовсе не поступаетъ въ аппаратъ. То же самое имѣетъ мѣсто и въ теченіе второго полуперіода: за первую его часть—третью четверть періода—отъ $2\pi nt = \pi$ до $2\pi nt = \frac{3\pi}{2}$ V измѣняется отъ $-V_M$ до 0, J измѣняется отъ 0 до $-J_M$, энергія положительна, и снова образуется магнитное поле; за вторую часть полуперіода, отъ $2\pi nt = \frac{3\pi}{2}$ до $2\pi nt = 2\pi$, V имѣетъ положительное значеніе и измѣняется отъ 0 до V_M , а значеніе J отрицательно и измѣняется отъ $-J_M$ до 0, энергія отрицательна, т.-е. энергія магнитнаго поля вновь отдается обратно.

Когда электрическое и магнитное поля электромагнитнаго колебанія имѣютъ разность фазъ, равную 90° , то не происходитъ переноса энергіи; аппаратъ, въ который вступаютъ колебанія, попеременно получаетъ и отдаетъ энергію, ничего изъ нея не удерживая.

Если разность фазъ между напряженіемъ на зажимахъ V и силой тока J равна φ , такъ что $J = J_M \cdot \sin 2\pi nt$, $V = V_M \cdot \sin (2\pi nt + \varphi)$, то V можно разложить на два слагаемыхъ:

$$V = V_M \cdot \cos \varphi \cdot \sin 2\pi nt + V_M \cdot \sin \varphi \cdot \cos 2\pi nt,$$

изъ которыхъ первое имѣетъ одинаковую фазу съ J , а второе отличается по фазѣ отъ J на 90° . Соответственно и величина энергіи въ данный моментъ распадается на два слагаемыхъ, изъ которыхъ первое имѣетъ среднее значеніе, отличное отъ нуля, второе же въ среднемъ даетъ нуль. Именно,

$$U = V \cdot J = V_M \cdot J_M \cdot \cos \varphi \cdot \sin^2 2\pi nt + V_M \cdot J_M \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\pi nt \cdot \cos 2\pi nt$$

Такъ какъ среднее значеніе $\sin^2 2\pi nt$, какъ извѣстно, равно $\frac{1}{2}$, то энергія, переносимая переменнымъ полемъ за секунду, равняется

$$\bar{U} = V_{eff} \cdot J_{eff} \cdot \cos \varphi \text{ ваттъ.}$$

Чтобы найти энергію, переносимую въ эфирѣ синусоидальнымъ колебаніемъ, нужно умножить произведеніе эффективныхъ значеній силы тока и напряженія на косинусъ разности фазъ между ними.

Если между двумя мѣстами проводки переменнаго тока сопротивление проводки равняется R омамъ, то потеря напряженія между этими двумя мѣстами равняется $V' = R \cdot J$, ея эффективное значеніе равняется $V'_{eff} = R \cdot J_{eff}$ и разность фазъ между V' и J равна нулю. Потеря энергіи въ проводкѣ между обоими мѣстами равняется $V'_{eff} \cdot J_{eff} = R \cdot J_{eff}^2$; она зависитъ лишь отъ силы тока, но не отъ величины напряженія между двумя проволоками проводки и не отъ разности фазъ между напряженіемъ и силой тока. Такъ какъ переносимая энергія пропорціональна $\cos \varphi$, т.-е. при данномъ напряженіи генератора переменнаго тока тѣмъ больше, чѣмъ меньше φ , то отношеніе потерянной энергіи ко всей переносимой энергіи тѣмъ меньше, чѣмъ меньше разность фазъ φ между напряженіемъ и силой тока, и тѣмъ лучше, слѣдовательно, использована проводка. Если значеніе φ близко къ 90° , то и при большой силѣ тока переносится лишь небольшое количество энергіи, а провода все-таки нагрѣваются не меньше, чѣмъ при переносѣ большого количества энергіи. Поэтому при передачѣ энергіи выгодно, чтобы значеніе φ было по возможности мало.

Энергію переменнаго тока можно, подобно энергіи постояннаго тока, измѣрять при помощи ваттметра, описаннаго въ § 288. Если съ помощью этого аппарата найти величину \bar{U} и, кромѣ того, при помощи специальныхъ инструментовъ для переменнаго тока опредѣлить величины V_{eff} и J_{eff} , то при синусоидальныхъ колебаніяхъ можно по тремъ измѣреннымъ величинамъ опредѣлить разность фазъ φ между напряженіемъ и силою тока, пользуясь уравненіемъ

$$\cos \varphi = \frac{\bar{U}}{V_{eff} \cdot J_{eff}}.$$

ДРОССЕЛЬНЫЯ (РЕАКТИВНЫЯ) КАТУШКИ.

373. Какъ мы видѣли, индуктивныя сопротивления не поглощаютъ энергіи; на этомъ основано устройство дроссельныхъ или реактивныхъ катушекъ, помощью которыхъ напряженіе переменнаго тока, слишкомъ высокое для опредѣленной цѣли, понижается до желательной величины.

При описаніи установокъ постояннаго тока въ § 364, мы упоминали, что дуговые лампы всегда горятъ при напряженіи, равномъ 55 вольтамъ. Если станція даетъ 110 вольтъ, то нужно или брать

две лампы, включенные последовательно, или же, если желают пользоваться только одной лампой, слѣдуетъ включить сопротивление, которое понизило бы напряжение до 55 вольтъ. Последний способъ, однако, весьма убыточенъ, такъ какъ предварительное сопротивление, какъ мы видѣли, поглощаетъ ровно столько же энергии, какъ и лампа.

Гораздо удобнѣе имѣть дѣло съ переменнымъ токомъ, такъ какъ здѣсь для пониженія напряжения, вмѣсто сопротивления, можно включить самоиндукционную катушку — дроссельную катушку. Диаграмма (рис. 278) показываетъ, какъ можно графически вычислить напряжение V_2 , которое должно быть поглощено самоиндукционной катушкой, по данному напряженію V станціи и требуемому напряженію V_1 . Если, далѣе, извѣстны нормальная сила тока J и число періодовъ n , то можно вычислить самоиндукцію L , которую нужно дать дроссельной катушкѣ: $L = \frac{V_2}{2\pi n \cdot J}$. Дроссельная катушка, конечно, должна имѣть желѣзный сердечникъ, составленный изъ полосъ, во избѣжаніе вихревыхъ токовъ. Но и при такомъ устройствѣ сердечникъ поглощаетъ нѣкоторое количество энергии вслѣдствіе гистерезиса; однако, потеря энергии въ дроссельной катушкѣ чрезвычайно мала въ сравненіи съ потерей энергии въ дроссельномъ сопротивленіи.

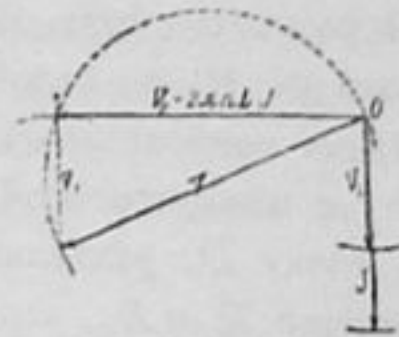


Рис. 278. Часовая диаграмма дроссельной катушки.

СРАВНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВЪ САМОИНДУКЦИИ.

374. Въ продажѣ имѣются точно калиброванные катушки определенной постоянной самоиндукціи, на примѣръ, въ 1 генри. Эти катушки, понятно, совершенно лишены желѣза, такъ какъ иначе ихъ самоиндукція не могла бы быть вполнѣ постоянной. Простѣйшій методъ измѣренія коэффициентовъ самоиндукціи другихъ катушекъ заключается въ томъ, что ихъ сравниваютъ съ точно калиброванными катушками. Это легко сдѣлать въ случаѣ переменнаго тока, пользуясь особымъ видомъ моста Витстона съ телефономъ (§ 269). Слѣдуетъ лишь въ одной вѣтви замѣнить оба сопротивления самоиндукционными катушками, коэффициенты которыхъ L_1 и L_2 желаютъ сравнить; въ другой вѣтви остается измѣрительная проволока. Если истинное сопротивление самоиндукционныхъ катушекъ

МЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СВЯЗИ ВЪ ТРАНСФОРМАТОРѢ.

377. Въ качествѣ механической модели обѣихъ электрическихъ трансмиссій — двойной проводки, связанной черезъ трансформаторѣ, мы возьмемъ два трансмиссионные вала. Желѣзному сердечнику трансформатора будетъ соответствовать маховое колесо (рис. 280), соединенное съ обоими валами такимъ образомъ, что каждый можетъ вращаться независимо отъ другого подобно тому, какъ каждая изъ двухъ трансформаторныхъ проводокъ можетъ нести токъ независимо отъ другой. При этомъ нужно, однако, чтобы они могли быть связаны между собою дѣйствіемъ инерціи колеса, которое вполне аналогично дѣйствію инерціи магнитнаго поля. Какъ можетъ

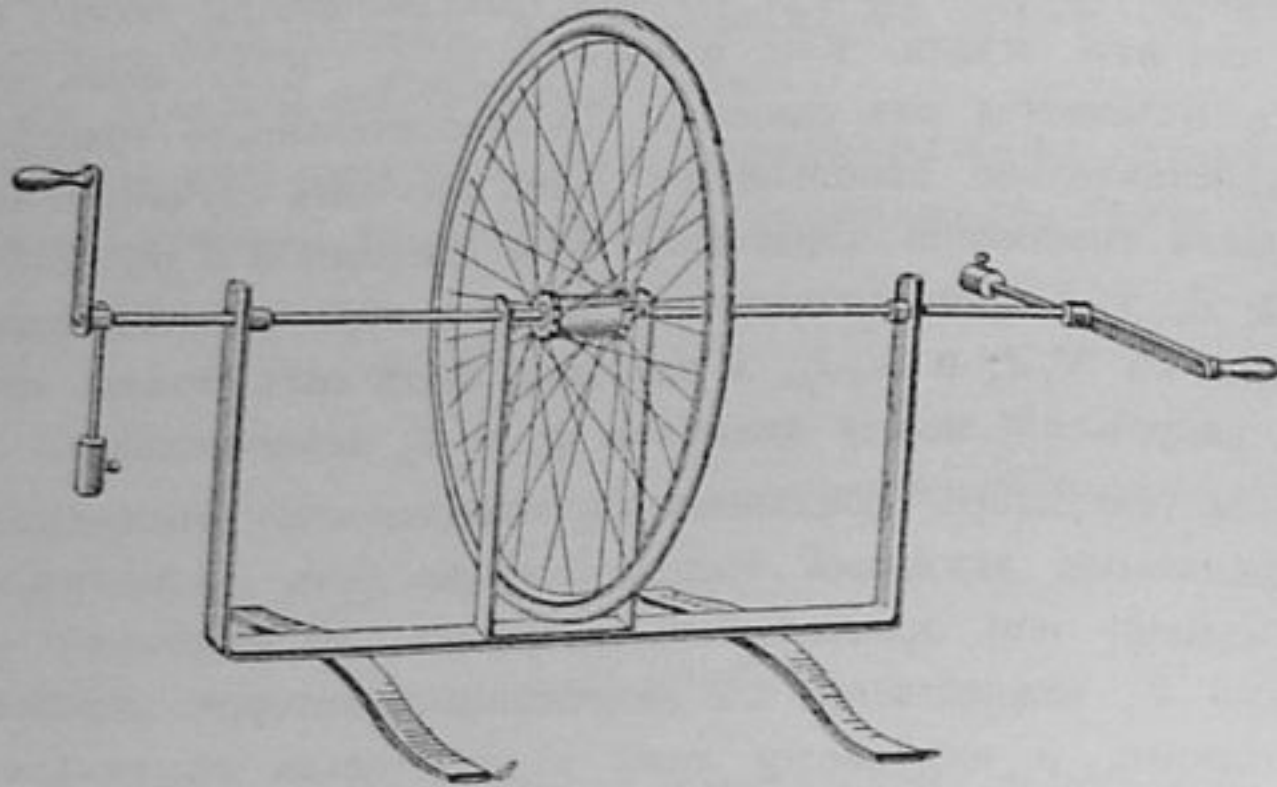


Рис. 280. Два трансмиссионные вала, связанные между собою инерціей махового колеса.

быть произведено соединеніе валовъ съ маховымъ колесомъ для полученія инерціонной связи, показываютъ представленныя на рис. 281 сѣченія черезъ ступицу связывающаго махового колеса. Ступица представляетъ собою широкую цилиндрическую капсулю, въ которую съ обѣихъ сторонъ входятъ своими концами связываемые вала I и II. Концы валовъ внутри ступицы сдѣланы въ видѣ короткихъ зубчатыхъ валиковъ. Ихъ зубцы зацѣпляютъ по три зубчатыхъ валика, которые расположены вокругъ нихъ симметрично и подшипники которыхъ находятся въ боковыхъ стѣнкахъ капсули, т.-е. неподвижно соединены съ маховымъ колесомъ. Изъ шести валиковъ три

(1, 3 и 5) соединены с валом I, и три (2, 4, 6) соединены с валом II. Все шесть валиков несколько длиннее концов трансмиссионных валов и в средней части капсулы, куда не доходят концы валов, каждый валик сцепляется с двумя соседними.

Если мы теперь будем держать вал II неподвижно и вращать вал I за рукоятку, то мы приведем во вращение маховое колесо. Это соответствует процессу в трансформаторе, когда мы при разомкнутой вторичной обмотке прикладываем к первичной обмотке некоторое напряжение; при этом развивается электрический ток и вместе с ним магнитное поле в железном сердечнике. Когда мы приводим во вращение вал I, то нам приходится главным образом преодолевать сопротивление инерции махового колеса („самоиндукцию“); когда же мы достигнем постоянной скорости вращения, то вращающая сила должна будет уравновешивать лишь сопротивление трения в подшипниках („омическое сопротивление проводов“). Если желают быстро прекратить вращение, то для преодоления инерции махового колеса нужно приложить тормозящую силу, которой уничтожается накопленная в колесе энергия движения.

Если, наоборот, держать неподвижным маховое колесо, то вал I можно будет вращать, лишь если оставить свободным вал II, который при этом неподвижно связан с валом I и вращается вместе с ним. Соответствующее явление мы можем получить в трансформаторе, лишь если включим параллельно первичную и вторичную обмотки таким образом, чтобы при соединении с источником тока они оба получали ток одновременно и в противоположных направлениях. Если затем соответствующей регулировкой сопротивлений уравнять числа ампер-витков обеих катушек, то в трансформаторе не может вообще возникнуть магнитное поле; вместе с тем совершенно так же, как в механической модели, оба трансмиссии будут тогда неподвижно соединены между собою.

Если мы оставим свободным колесо и оба вала и будем быстро вращать рукоятку вала I периодически в ту и другую сторону, то инерция колеса действует совершенно так же, как если бы оно было закреплено. Колесо совершает лишь слабые колебания, между тем как большие колебания вала I переносятся целиком на вал II, соответственно диаграмме трансформации б на рис. 279. Подобно тому, как при электромагнитной инерционной связи маг-

нитное поле в железном сердечнике смещено приблизительно на 90° относительно силы тока в первичной и вторичной обмотках, точно так же и в механической инерционной связи слабые колебания махового колеса всегда отстают приблизительно на четверть колебания относительно движений трансмиссионных валов. Подобно тому как электромагнитная инерционная связь пригодна лишь для переменного тока, точно так же и механическая связь функционирует лишь при переменных вращениях. Если же вращать вал I все в одном направлении, то вращение вала II — „индукционный удар“

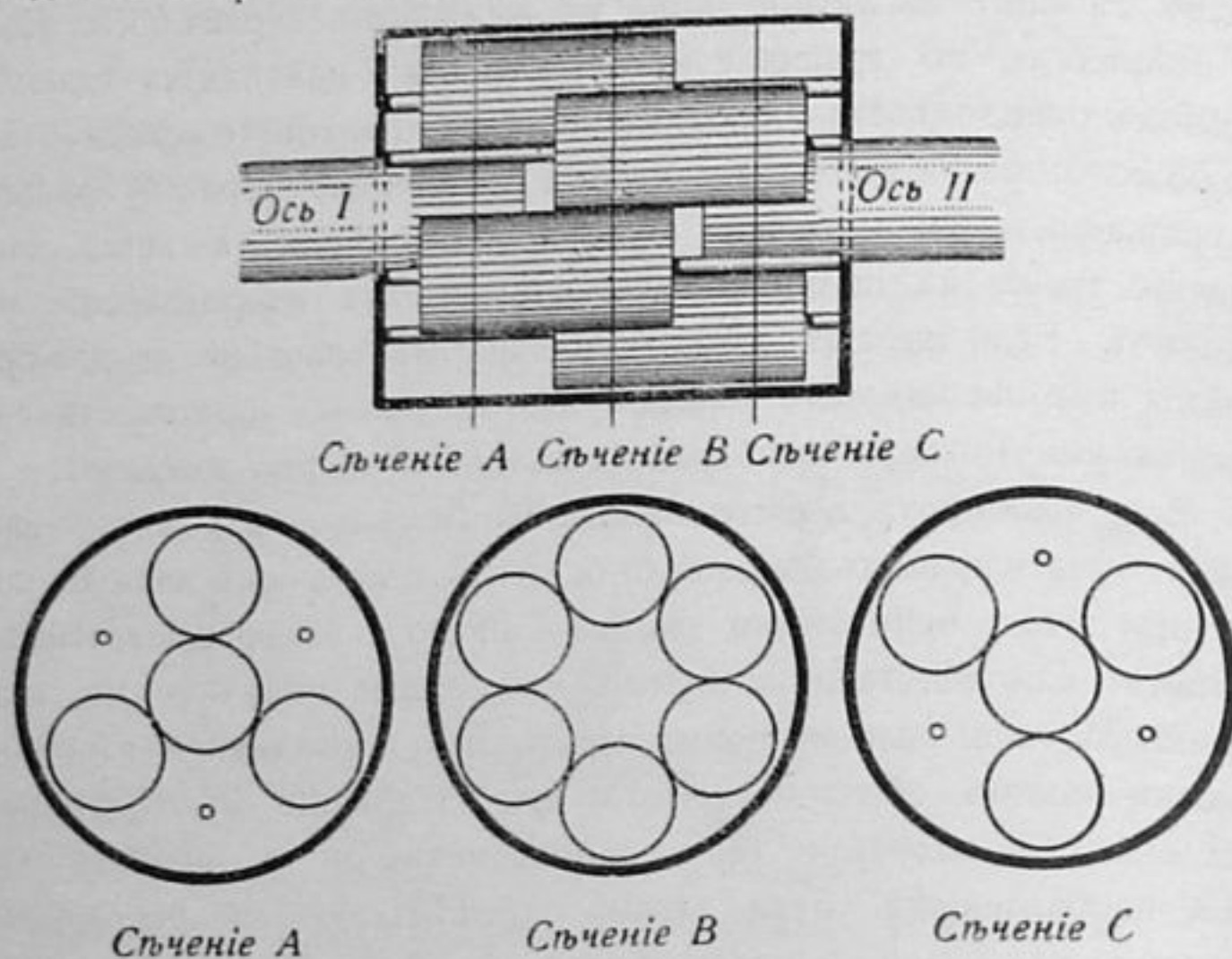


Рис. 281. Внутренний механизм ступицы махового колеса, служащего для инерционной связи.

тока“ — наблюдается лишь в начале движения, когда маховое колесо еще не пришло в движение. Это вращение, однако, скоро прекращается вследствие трения в подшипниках, как только маховое колесо приходит во вращение, и устанавливается стационарное состояние, при котором вал II находится в покое и маховое колесо вращается вместе с валом I, как при неподвижном валу II. Когда мы прекратим вращение вала I, то инертное маховое колесо останавливается не сразу и, так как вал I уже больше не вращается, то вал II вращается до тех пор, пока трение не по-

глотить энергіи движенія колеса. Это явленіе соотвѣтствуетъ индукціонному удару тока при размыканіи первичной цѣпи.

Связь, представленная на рис. 281, соотвѣтствуетъ электромагнитной связи въ трансформаторѣ, у котораго вторичная обмотка имѣетъ такое же число витковъ, какъ и первичная, и коэффициентъ трансформации поэтому равняется единицѣ. Примѣняя валки различныхъ діаметровъ, можно получить механическія инерціонныя связи со всевозможными коэффициентами трансформации; такъ какъ энергія, доставляемая связи валомъ I, должна равняться энергіи, передаваемой связью валу II (потери вслѣдствіе тренія не принимаются въ расчетъ), то коэффициентъ трансформации для скоростей вращенія является обратной величиной коэффициента трансформации для вращающихся силъ. Мы имѣемъ здѣсь механическую аналогію предложенія, изложеннаго въ § 376.

ПРАКТИЧЕСКІЯ ПРИМѢНЕНІЯ ТРАНСФОРМАТОРОВЪ ПЕРЕМѢННАГО ТОКА.

378. Какъ мы видѣли, напряженіе станціи переменнаго тока возможно трансформировать по желанію въ болѣе высокое или болѣе низкое напряженіе при помощи весьма простыхъ аппаратовъ, каковы трансформаторы, въ которыхъ къ тому же происходятъ лишь незначительныя потери энергіи. Благодаря этому, при электромагнитной передачѣ энергіи на разстояніе, переменный токъ въ весьма многихъ случаяхъ имѣетъ большое преимущество передъ постояннымъ токомъ.

На рис. 282 представленъ обыкновенный типъ трансформатора переменнаго тока. Чѣмъ большія количества энергіи желательно передать, тѣмъ больше долженъ быть силовой потокъ магнитнаго поля, осуществляющаго связь. Чтобы достигнуть этого съ возможно меньшимъ количествомъ желѣза, „магнитное сопротивленіе“ сердечника трансформатора (§ 328) дѣлаютъ возможно меньшимъ. Въ трансформаторѣ, изображенномъ на рисункѣ, сердечникъ представляетъ собой замкнутый прямоугольникъ, составленный изъ четырехъ прочно свинченныхъ между собою желѣзныхъ стержней, безъ воздушныхъ щелей. Желѣзо, конечно, берется полосовое и полосы, изъ которыхъ составлены стержни, стягиваются вмѣстѣ деревянными обхватами. Около cadaго изъ двухъ вертикальныхъ стержней желѣзнаго прямоугольника укрѣплена цилиндрическая папковая насадка,

на которую намотана катушка низкаго напряженія. Она состоитъ изъ относительно малаго числа витковъ толстой проволоки. На рис. 282 она не видна, такъ какъ на нее надвинута катушка высокаго напряженія, состоящая изъ весьма большаго числа оборотовъ тонкой проволоки и навитая по секціямъ для достиженія лучшей изоляціи.

Важнѣйшее приложеніе трансформаторовъ состоитъ въ передачѣ энергіи на разстояніе. На центральной станціи устанавливаются генераторы переменнаго тока; они либо даютъ очень высокія напряженія непосредственно, либо же напряженіе ихъ повы-

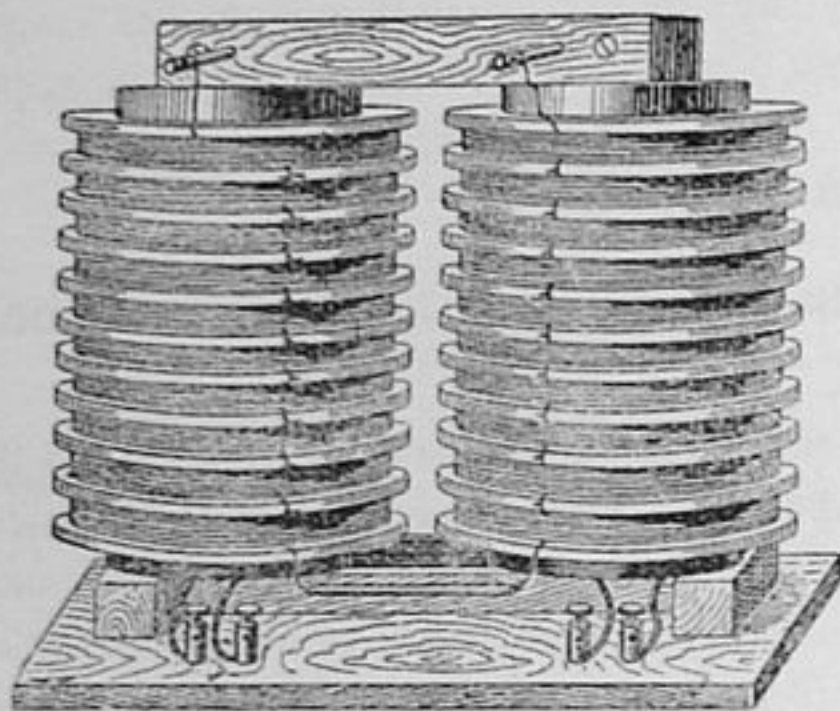


Рис. 282. Трансформаторъ переменнаго тока.

шается до нѣсколькихъ тысячъ вольтъ при помощи большаго трансформатора. Въ силу этого можно переносить на разстоянія весьма большія количества энергіи при относительно малыхъ силахъ тока. Если, напримѣръ, эффективное значеніе напряженія равно 10000 вольтъ, то при той же энергіи сила тока составляетъ сотую долю силы тока, соотвѣтствующей напряженію въ 100 вольтъ. Поэтому при такомъ напряженіи можно брать тонкія проволоки и, несмотря на то, имѣть лишь малыя потери энергіи. На подстанціяхъ устанавливаются меньшіе трансформаторы, понижающіе напряженіе до меньшей величины, удобной для потребителей (напримѣръ, 100 вольтъ), и отсюда идутъ домашнія проводки. На рис. 283 дана схема передачи энергіи при помощи переменнаго тока.

Таково весьма простое и весьма совершенное рѣшеніе технической проблемы, формулированной въ § 365: высокое напряженіе на цен-

тральной станціи, низкое напряженіе въ мѣстахъ потребленія. Ясно вмѣстѣ съ тѣмъ, что для передачи энергіи на большія разстоянія пригоденъ лишь переменный токъ. Методъ передачи энергіи на разстояніе переменными полями можно демонстрировать на очень простомъ опытѣ; для этого нужно установить два малые трансформатора, соединивъ ихъ зажимы высокаго напряженія посредствомъ длинныхъ проводовъ изъ очень тонкой проволоки ($\frac{1}{10}$ миллиметра). Если соединить зажимы низкаго напряженія одного трансформатора съ обыкновенной машиной переменнаго тока приблизительно въ 100 вольтъ, а зажимы низкаго напряженія другого трансформатора съ сильной электрической дуговой лампой, то можно заставить эту лампу ярко горѣть, при чемъ вся довольно значительная энергія доставля-

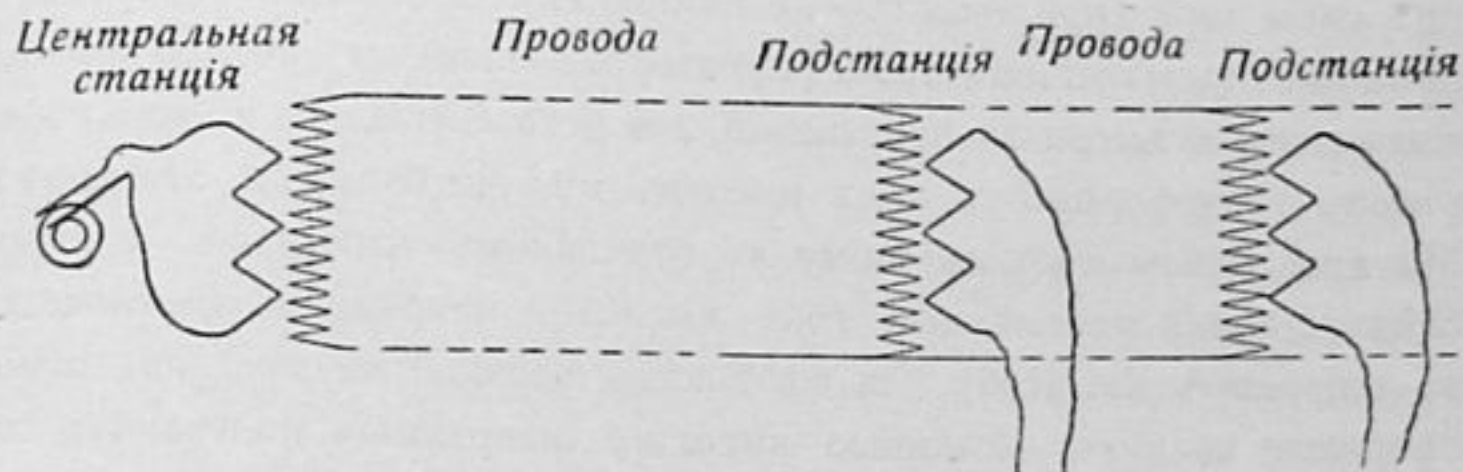


Рис. 283. Схема передачи энергіи на разстояніе помощью переменнаго тока.

ется лампѣ тончайшими проволоками, которыя при этомъ даже не нагрѣваются.

Если центральная станція переменнаго тока нагружена весьма неравномѣрно, какъ это обычно бываетъ на городскихъ центральныхъ станціяхъ, то пропадаетъ довольно большое количество энергіи. Отдача всѣхъ машинъ не велика, если онѣ работаютъ со слишкомъ малой нагрузкой; это слѣдуетъ сказать также и про трансформаторы на подстанціяхъ, такъ какъ при всей незначительности потерь энергіи вслѣдствіе сопротивленія и гистерезиса, онѣ въ ненагруженномъ трансформаторѣ не очень многимъ меньше, чѣмъ въ нагруженномъ. Поэтому въ теченіе дня и тѣхъ продолжительныхъ промежутковъ, когда потребленіе весьма ограничено, энергія теряется. Если можно пользоваться силами водопадовъ, такъ чтобы приходилось покрывать лишь издержки по установкѣ и обслуживанію, а самая энергія получалась даромъ, то указанныя потери энергіи не представляютъ никакого неудобства при системѣ переменнаго

тока. Иначе обстоитъ дѣло, когда энергія доставляется тепловыми машинами, такъ какъ въ этомъ случаѣ перерасходъ горючаго матеріала сильно повышаетъ издержки эксплуатаціи. При такихъ обстоятельствахъ переменный токъ, несмотря на всѣ свои преимущества, можетъ оказаться гораздо менѣе выгоднымъ, нежели постоянный токъ съ его гибкимъ резервуаромъ энергіи — аккумуляторной батареей. Поэтому на городскихъ электрическихъ станціяхъ часто отдають предпочтеніе постоянному току, какъ было уже объяснено въ § 364.

379. Трансформация переменнаго тока играетъ важную роль еще въ нѣкоторыхъ совершенно специальныхъ техническихъ приложенияхъ, именно во всѣхъ тѣхъ случаяхъ, когда необходимо имѣть чрезвычайно высокія напряженія (при малой силѣ тока) или же громадной силы токи (при низкихъ напряженіяхъ). Собственно говоря, старѣйшимъ примѣненіемъ трансформаторовъ является именно возбужденіе весьма высокыхъ напряженій, для чего специально и былъ изобрѣтенъ трансформаторъ подъ именемъ индукціоннаго аппарата. Мы еще возвратимся къ этому въ отдѣльномъ параграфѣ. Въ послѣднее время переменный токъ высокаго напряженія примѣняется въ широкомъ масштабѣ для фабрикаціи азотной кислоты изъ атмосфернаго воздуха. Помощью высокаго напряженія получаютъ гигантскія свѣтовые дуги, которыя вызываютъ въ продуваемомъ воздухѣ химическое соединеніе части азота съ кислородомъ въ окись азота; изъ этой послѣдней уже легко получается азотная кислота.

Задачей, обратной возбужденію высокыхъ напряженій, является возбужденіе чрезвычайно сильныхъ токовъ низкаго напряженія. Для этой цѣли строятся особые трансформаторы, вторичная обмотка которыхъ состоитъ изъ весьма небольшого числа витковъ очень толстой мѣдной проволоки. Такіе трансформаторы часто употребляются на большихъ фабрикахъ для сварки желѣза, раскаляемаго помощью сильнаго переменнаго тока (сварочные трансформаторы).

ВОЗМОЖНЫ ЛИ ТРАНСФОРМАТОРЫ ПОСТОЯННАГО ТОКА?

380. Если бы существовалъ столь же простой методъ трансформации постояннаго тока, какой существуетъ для переменнаго тока, то, конечно, постоянный токъ слѣдовало бы предпочитать во всѣхъ случаяхъ; это была бы вполне идеальная система передачи энергіи. Къ сожалѣнію, не существуетъ простыхъ трансформаторовъ постояннаго тока. Существуютъ лишь вращающіеся конверторы (преобразователи)

постоянного тока. Такой конверторъ представляет собою двѣ механически связанныя машины постоянного тока, изъ которыхъ одна служитъ моторомъ, а другая — динамо. Если эти двѣ машины имѣютъ различныя напряженія между зажимами то электрическая энергія опредѣленнаго напряженія, введенная въ такую двойную машину съ одной стороны, будетъ получаться съ другой стороны съ инымъ напряженіемъ. Но такой „трансформаторъ“, конечно, никоимъ образомъ не можетъ быть сравниваемъ съ трансформаторомъ переменнаго тока. Уже съ чисто практической точки зрѣнія онъ представляет собой нѣчто совершенно иное. Это — сложная машина, которая, во-первыхъ, дорого стоитъ, во-вторыхъ, не можетъ быть просто помѣщена въ трансформаторной будкѣ, но требуетъ непрерывнаго присмотра, въ-третьихъ, даетъ несравненно бѣольшую потерю энергіи, нежели простой трансформаторъ переменнаго тока. Понятно само собою, что проводка постоянного тока съ такими „трансформаторами“, аналогичная проводкѣ переменнаго тока, представленной схематически на рис. 283, практически совершенно невозможна.

Было бы чрезвычайно интересно разрѣшить окончательно вопросъ, возможны ли трансформаторы для постоянного тока безъ подвижныхъ машинныхъ частей, которые поэтому были бы столь же удобны, какъ и трансформаторы для переменнаго тока. Этотъ вопросъ можетъ быть сведенъ къ другому, болѣе глубокому вопросу: возможно ли получить положительный и отрицательный магнитные полюсы отдѣльно другъ отъ друга, подобно положительнымъ и отрицательнымъ электрическимъ зарядамъ, иными словами, существуютъ ли магнитные іоны, подобно электрическимъ? Если бы магнитные іоны существовали, то можно было бы получить магнитный проводникъ, въ которомъ магнитные іоны могли бы свободно двигаться, какъ электрическіе іоны въ электрическомъ проводникѣ. Если бы при этомъ замкнутая магнитная цѣпь въ трансформаторѣ, изображенномъ на рис. 282, была замѣнена замкнутой цѣпью изъ магнитнаго проводника, то получился бы настоящій трансформаторъ постоянного тока. При прохожденіи постоянного тока черезъ первичную обмотку магнитное поле внутри катушки дѣйствовало бы, какъ настоящая „магнитодвижущая сила“ и вызывало бы въ проводящемъ магнетизмъ сердечникѣ постоянный токъ магнитныхъ іоновъ. Но, какъ мы видѣли въ § 304, движущійся маг-

нитный полюсь всегда сопровождается электрическими силовыми линиями, кольцеобразно его обвивающими. Поэтому магнитный токъ долженъ былъ бы быть окруженъ постояннымъ электрическимъ полемъ, вполне сходнымъ съ магнитнымъ полемъ, окружающимъ электрической токъ (рис. 152). При этомъ, если пренебречь омической потерей напряженія, напряженіе между зажимами первичной обмотки было бы равно полной величинѣ электрическаго поля, окружающаго магнитный проводникъ, умноженной на число витковъ катушки. Такимъ образомъ, сила магнитнаго тока вполне опредѣлялась бы напряженіемъ между зажимами первичной обмотки. Напряженіе между зажимами вторичной обмотки относилось бы къ напряженію между зажимами первичной обмотки, какъ соотвѣтственныя числа витковъ (трансформирующій коэффициентъ). Если бы мы брали токъ отъ вторичной катушки, то онъ дѣйствовалъ бы обратно на первичный токъ такимъ образомъ, чтобы числа амперъ-витковъ обоихъ токовъ вмѣстѣ всегда давали магнитный токъ въ сердечникѣ трансформатора, вполне опредѣляемый напряженіемъ между зажимами первичной обмотки. Словомъ, мы получили бы трансформаторъ постоянного тока, функционирующій совершенно такимъ же образомъ, какъ обыкновенный трансформаторъ переменнаго тока. Однако, къ сожалѣнію, наше предположеніе о существованіи магнитныхъ іоновъ ложно.

Невозможно построить правильный трансформаторъ постоянного тока безъ движущихся машинныхъ частей, такъ какъ не существуетъ магнитныхъ зарядовъ и магнитныхъ проводниковъ.

Мы видимъ, такимъ образомъ, что важный для техники вопросъ о возможности трансформатора постоянного тока тѣснѣйшимъ образомъ связанъ съ основными принципами физики эѳира. Дѣйствительно, то обстоятельство, что не существуетъ магнитныхъ зарядовъ, зависитъ отъ того, что между эѳиромъ и матеріей существуетъ лишь одна дѣйствительная связь, именно, электрической зарядъ; этотъ послѣдній вызываетъ какъ электрическое, такъ и (при своемъ движеніи) магнитное состояніе въ эѳирѣ (ср. § 291).

Съ вопросомъ о возможности трансформатора постоянного тока тѣсно связанъ также вопросъ о генераторахъ и моторахъ постоянного тока безъ скользящихъ контактовъ. Генераторы переменнаго тока возможны безъ скользящихъ контактовъ; таковы, на примѣръ,

машины съ внутренними полюсами (§ 369), которыя можно было бы строить и съ постоянными магнитами. Ниже мы познакомимся и съ моторами переменнаго тока, не имѣющими скользящихъ контактовъ. Но машины постоянного тока безъ скользящихъ контактовъ невозможны (ср. § 236). Причина та же, по которой невозможны трансформаторы постоянного тока.

ИНДУКЦИОННЫЙ АППАРАТЪ.

381. Трансформаторы, служащіе специально для возбужденія высокихъ напряженій, давно уже употребляются въ физикѣ подъ названіемъ индукціонныхъ аппаратовъ или индукторовъ. По сравненію съ индуктивными машинами (электростатическими), которыя, вообще, даже превосходятъ ихъ по высотѣ напряженія, они имѣютъ то преимущество, что доставляютъ токи гораздо большей силы,

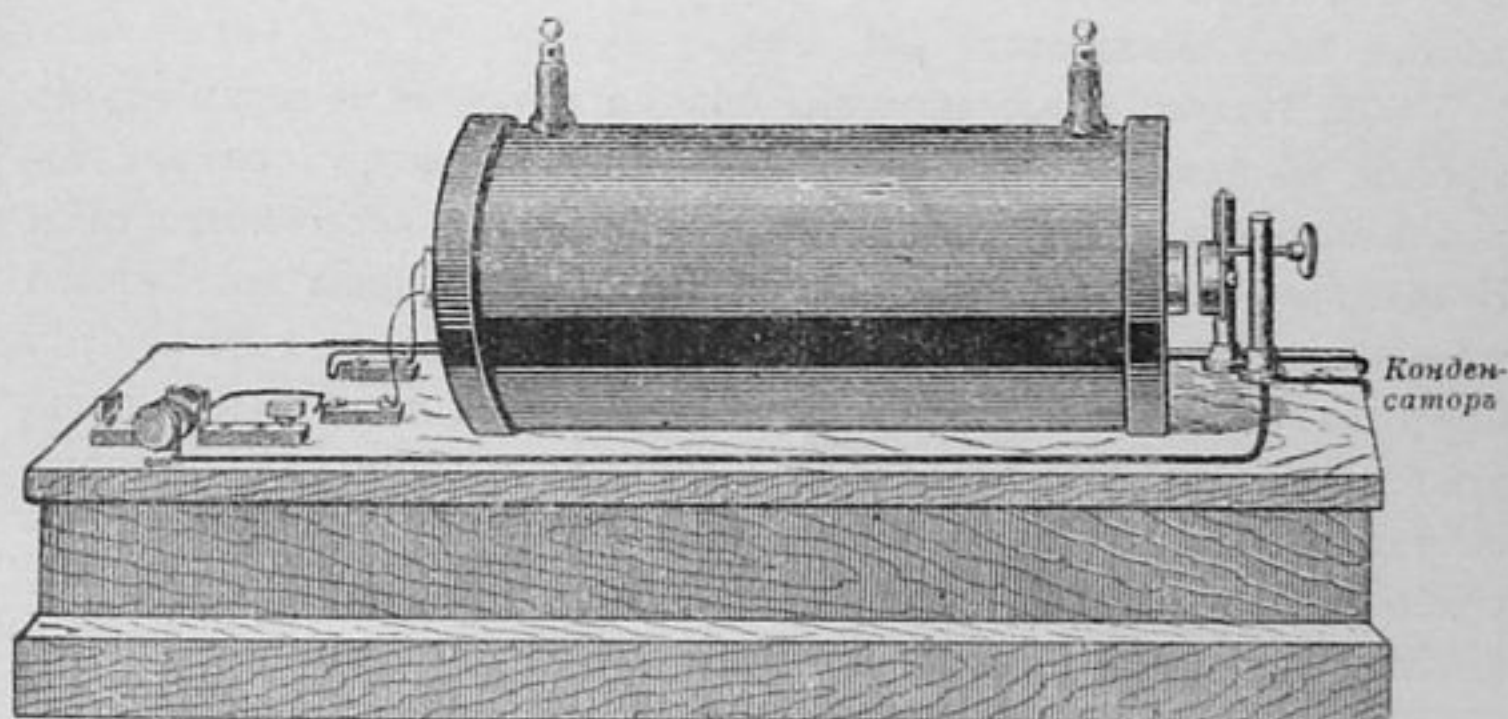


Рис. 284. Индукціонный аппаратъ для высокихъ напряженій съ молоткомъ-прерывателемъ.

или, что сводится къ тому же, гораздо большія количества энергіи. Такъ, напримѣръ, опыты надъ разрядами въ разряженныхъ газахъ прежде, когда еще не умѣли строить аккумуляторныхъ батарей и машинъ постоянного тока, дающихъ высокое напряженіе, производились почти исключительно при помощи индукціонныхъ аппаратовъ, такъ какъ энергія, доставляемая индуктивными машинами, слишкомъ незначительна.

Такъ какъ въ индукціонномъ аппаратѣ экономія не играетъ такой большой роли, какъ въ трансформаторахъ, употребляемыхъ въ технику, то его строятъ, почти исключительно для большаго простоты, съ незамкнутымъ желѣзнымъ сердечникомъ. Берутъ прямой цилиндрической желѣзный стержень, составленный, во избѣжаніе вихревыхъ токовъ, изъ тонкихъ, изолированныхъ одна отъ другой желѣзныхъ проволокъ, надвигаютъ на него первичную обмотку, состоящую изъ небольшого числа оборотовъ толстой мѣдной проволоки, и на первичную обмотку надвигаютъ вторичную обмотку; послѣдняя должна выдерживать высокія напряженія и потому она изготовляется съ особою тщательностью. Вторичная обмотка дѣлается изъ тонкой мѣдной проволоки и имѣетъ весьма большое число оборотовъ, тщательно другъ отъ друга изолированныхъ и разложенныхъ секціи. Снаружи она заливается хорошо изолирующей массой и, по большей части, окружается цилиндрической твердой каучуковой оболочкой, какъ показываетъ рис. 284.

382. Индукціонные аппараты обычно питаются не переменнымъ токомъ, но правильно пульсирующимъ выпрямленнымъ токомъ, который можно брать отъ обыкновеннаго источника постоянного тока. Необходимо только въ проводъ, идущій отъ источника постоянного тока къ первичной катушкѣ, включить периодически дѣйствующій прерыватель. Для измѣреній переменнаго тока весьма часто пользуются, какъ мы уже видѣли въ § 269, небольшимъ индукторомъ съ периодическимъ прерывателемъ, въ качествѣ преобразователя постоянного тока въ переменный. Переменное напряженіе между зажимами вторичной обмотки изображеннаго тамъ очень маленькаго индуктора гораздо выше напряженія аккумулятора, служащаго источникомъ постоянного тока; именно, оно близко къ 100 вольтамъ, что удобно для измѣреній. Оно не представляетъ собою синусоидальнаго колебанія: измѣненіе напряженія въ первую половину періода, когда первичный токъ возрастаетъ, иное, нежели во вторую половину, въ теченіе которой первичный токъ понижается до нуля. Однако, по законамъ индукціи положительные и отрицательные удары напряженія въ общей сложности равны между собою, и этого свойства вполне достаточно для весьма многихъ измѣреній.

Старѣйшимъ и теперь еще наиболѣе употребительнымъ прерывателемъ для индукціонныхъ аппаратовъ является молоточекъ Вагнера;

въ § 347 мы уже познакомились съ его дѣйствиемъ въ качествѣ аппарата для возбужденія пульсирующихъ токовъ. Прерыватель по большей части приводится въ движеніе желѣзнымъ сердечникомъ самаго индуктора; это видно на рисункѣ 284, гдѣ представленъ аппаратъ, снабженный молоточкомъ. Если желательнo получать между зажимами вторичной обмотки очень высокія напряженія, то для этой цѣли пользуются ударомъ напряженія при размыканіи первичнаго тока. Мы видѣли уже въ § 310, что при размыканіи тока можно получать гораздо болѣе высокія напряженія, нежели при замыканіи, и притомъ тѣмъ болѣе высокія, чѣмъ быстрее прекращаютъ токъ. Поэтому слѣдуетъ заботиться о возможно болѣе скоромъ потуханіи свѣтовой дуги, всегда возникающей въ мѣстѣ размыканія первичнаго тока. Для этого, по предложенію Физо (Fizeau, 1853), служитъ конденсаторъ высокой емкости (отъ 0,1 до 1 М. Ф.), непосред-

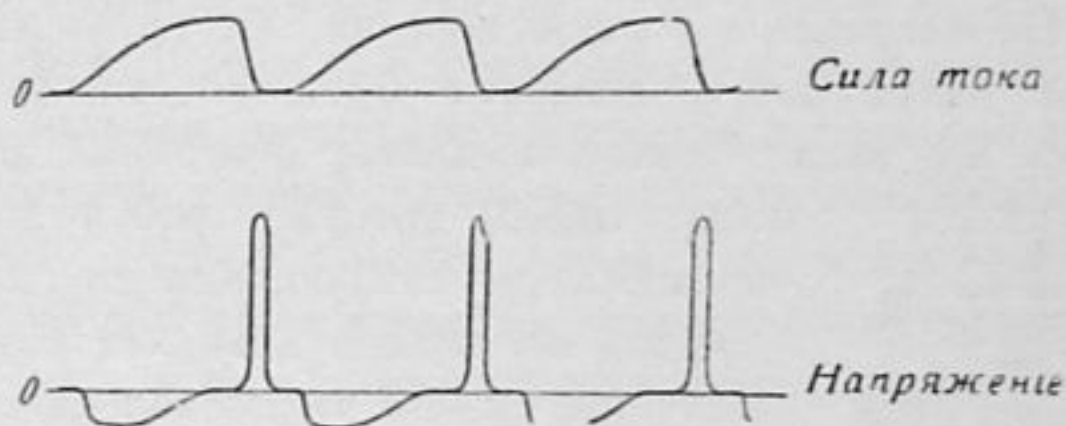


Рис. 285. Кривыя силы тока и напряженія индуктора, питаемаго прерывистымъ постояннымъ токомъ.

ственно присоединяемый параллельно мѣсту размыканія. Въ качествѣ діэлектрика для этого конденсатора берутъ по большей части пропитанные парафиномъ бумажные листы. Вслѣдствіе малой толщины діэлектрика такой конденсаторъ занимаетъ мало мѣста и помѣщается въ плоскомъ деревянномъ ящикѣ, на которомъ устанавливается индукторъ. На рис. 284 видны соединенія мѣста размыканія съ обкладками конденсатора. Вслѣдствіе большой емкости конденсатора токъ, заряжающій его до напряженія самоиндукціи, возникающаго въ мѣстѣ перерыва, довольно силенъ; образуя отвѣтвленіе, параллельное свѣтовой дугѣ размыканія, онъ отнимаетъ отъ послѣдней большую долю тока. Но ослабленіе тока оказываетъ вліяніе на свѣтовую дугу—она гораздо легче тухнетъ; такимъ образомъ, благодаря присоединенію конденсатора, свѣтовая дуга размыканія становится гораздо болѣе кратковременной, чѣмъ при отсутствіи конденсатора,

такъ что перерывъ первичнаго тока совершается гораздо быстрее. Кривыя рис. 285 показываютъ, какъ періодически измѣняются, во-первыхъ, амперъ-витки магнитнаго поля и, во-вторыхъ, напряженіе между зажимами индуктора. Кривая напряженія весьма не симметрична: при замыканіи она пологая и широкая, а при размыканіи — крутая и узкая. Какъ мы видѣли выше, включеніе конденсатора дѣлаетъ ударъ напряженія при размыканіи особенно рѣзкимъ. Если зажимы вторичной обмотки такого индукціоннаго аппарата соединить съ электродами Гейслеровой трубки, то обычно лишь напряженіе размыканія вызываетъ разрядъ, такъ какъ напряженіе при замыканіи первичнаго тока далеко не достигаетъ величины разряднаго потенциала. Такимъ образомъ, можно съ извѣстнымъ правомъ различать зажимы вторичной обмотки, какъ положительный и отрицательный, такъ какъ разрядный токъ идетъ лишь въ одномъ направленіи. Но напряженіе будетъ, конечно, все время переменнымъ.

Первые индукціонные аппараты были построены въ сороковыхъ годахъ XIX вѣка. Первый аппаратъ, пригодный для медицинскихъ цѣлей, которыя требуютъ лишь полученія быстро слѣдующихъ другъ за другомъ ударовъ напряженія довольно незначительной величины, именно въ нѣсколько сотъ вольтъ, построилъ Э. Дюбуа-Реймонъ (E. Du Bois-Reymond) въ 1848 году. Большіе индукторы для высокихъ напряженій впервые началъ строить Румкорфъ (Ruhmkorff) въ Парижѣ (съ 1850 года).

383. За послѣднее время выяснилась необходимость въ прерывателѣ, который работалъ бы быстрее молоточнаго, такъ чтобы можно было брать отъ индуктора большія количества энергіи въ секунду, на примѣръ, для питанія Рентгеновыхъ лампъ. Чаще всего съ этой цѣлью употребляется быстро вращающійся прерыватель,

приводимый въ движеніе особымъ небольшимъ электромоторомъ. Одинъ изъ типовъ вращающагося прерывателя — струйный ртутный прерыватель — представленъ на рис. 286. Въ довольно широкомъ сосудѣ вращается вертикальная ось, на которую снизу насажена круглая желѣзная пластинка. Радиальный каналъ въ этой пла-

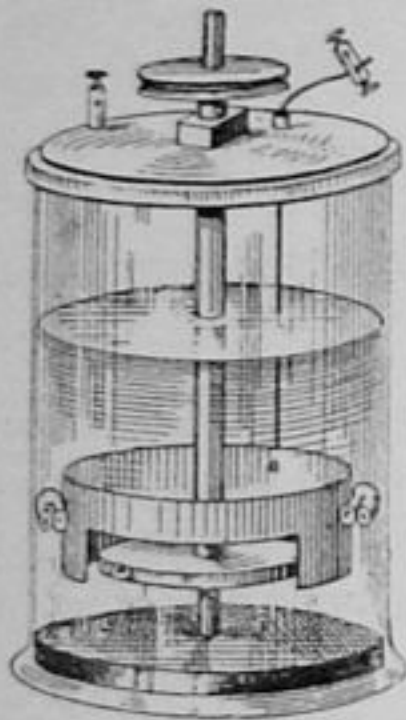


Рис. 286. Ртутный струйный прерыватель (турбинный прерыватель).

стинкѣ соединяется при посредствѣ канала, идущаго внутри оси внизъ, со ртутью, покрывающею дно сосуда. Вслѣдствіе возникающей центробѣжной силы ртуть всасывается вверхъ и выбрасывается тонкой струей изъ радіального канала. Эта ртутная струя образуетъ хорошо проводящее соединеніе съ желѣзнымъ цилиндромъ, окружающимъ желѣзную пластинку. Желѣзный цилиндръ имѣетъ въ нѣсколькихъ мѣстахъ вырѣзы, и въ каждомъ вырѣзѣ контрактъ прерывается. Ось соединена съ однимъ зажимомъ, а желѣзный цилиндръ съ другимъ, и такимъ образомъ они могутъ быть включены въ первичную цѣпь индуктора. Чтобы избѣжать вредныхъ паровъ ртути и по возможности уменьшить продолжительность искры размыканія, сосудъ больше чѣмъ наполовину заполняется алкоголемъ и герметически закупоривается. Съ помощью этого аппарата можно легко получить много сотенъ прерываній въ секунду.

При всѣхъ быстро дѣйствующихъ прерывателяхъ слѣдуетъ брать болѣе высокое первичное напряженіе, нежели при медленныхъ, такъ какъ магнитное поле въ индукторѣ при пользованіи скорыми прерывателями должно гораздо скорѣе достигать максимальнаго значенія, съ котораго оно внезапно низводится при перерывѣ тока до нуля. Но нельзя пускать прерыватель медленно, когда къ нему приложено высокое напряженіе, такъ какъ въ этомъ случаѣ первичный токъ можетъ слишкомъ сильно возрасти и обмотка можетъ перегорѣть. Кромѣ того, высокое напряженіе слѣдуетъ прилагать, лишь когда прерыватель уже пущенъ въ ходъ и дѣлаетъ нормальное число оборотовъ.

Прерыватель Венельта, принадлежащій къ числу быстро дѣйствующихъ, основанъ на совершенно иномъ принципѣ, чѣмъ до сихъ поръ описанные прерыватели. Онъ состоитъ изъ большого стекляннаго сосуда съ разведенной сѣрной кислотой, въ которую погружены два электрода, весьма неодинаковые по величинѣ своей поверх-

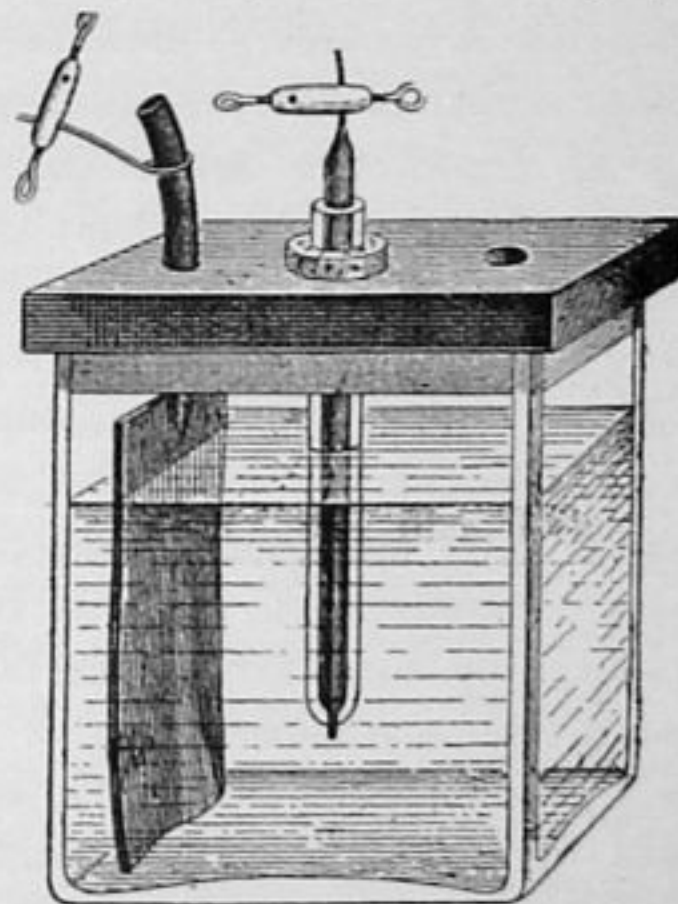


Рис. 287. Прерыватель Венельта.

ности. Одинъ электродъ представляетъ собою большую полосу свинца, тогда какъ другимъ служитъ тонкое остріе платиновой проволоки, которое выдается изъ окружающей проводъ стеклянной или фарфоровой трубки. Когда этотъ элементъ включаютъ въ первичную цѣпь индуктора такъ, чтобы платиновое остріе было анодомъ, то на остріѣ возникаютъ очень быстро, но равномерно (нѣсколько сотъ разъ въ секунду), пузыри пара; каждымъ изъ нихъ токъ на короткое время прерывается. Эти пузыри пара образуются вслѣдствіе большой плотности тока на маленькомъ остріѣ, вызывающей очень сильное нагрѣваніе. Для возникновенія каждаго пузыря требуется вполне опредѣленный промежутокъ времени, въ теченіе котораго электрической токъ и нагрѣваніе острія возрастаютъ до надлежащей высоты. Величина этого промежутка времени зависитъ отъ приложеннаго напряженія, самоиндукціи первичной обмотки, величины острія и температуры разбавленной сѣрной кислоты. Вслѣдствіе того, что всегда имѣетъ мѣсто перегрѣваніе, пузырь образуется почти моментально, и токъ поэтому прерывается очень быстро. Вслѣдствіе хорошей теплопроводности окружающей среды, температура тотчасъ же падаетъ, пузырь пара конденсируется, сѣрная кислота вновь приходитъ въ соприкосновеніе съ платиновымъ остріемъ, токъ замыкается, и процессъ начинается снова. Пока указанные четыре фактора остаются постоянными, число перерывовъ также постоянно. Если же одинъ изъ этихъ факторовъ измѣняется, то измѣняется тотчасъ же и число перерывовъ, что можно замѣтить по измѣненію громкаго звука, непрерывно испускаемаго прерывателемъ. Платиновое остріе должно служить анодомъ, такъ какъ между металлическимъ анодомъ и воднымъ катодомъ не образуется свѣтовой дуги вслѣдствіе того, что для образованія послѣдней катодъ долженъ быть раскаленъ. Наоборотъ, между платиновымъ катодомъ и электролитическимъ анодомъ образуется свѣтовая дуга, и пузырекъ пара не вызываетъ тогда перерыва тока. Такъ какъ искра размыканія при платиновомъ анодѣ тотчасъ же тухнетъ сама собою, то при прерывателѣ Венельта нѣтъ надобности включать конденсаторъ, какъ при прерывателяхъ описанныхъ выше.

Съ прерывателемъ Венельта весьма сходенъ прерыватель Симона (прерыватель съ малымъ отверстиемъ); онъ состоитъ изъ сосуда съ разбавленной сѣрной кислотой, въ которую погружены два большіе свинцовые пластинчатые электрода, раздѣленные стеклянной перегород-

кой съ маленькимъ отверстіемъ. Такъ какъ весь токъ долженъ пройти черезъ это отверстіе, то плотность тока и нагрѣваніе около него усиливаются настолько, что наступаетъ парообразование и, вообще, тѣ же процессы, что и въ прерывателѣ Венельта. Въ качествѣ стеклянной перегородки лучше всего воспользоваться пробиркой, погруженной нижнею частью въ сѣрную кислоту, съ маленькимъ отверстіемъ на днѣ; внутри пробирки помѣщается одинъ электродъ. Въ прерывателѣ Симона оба электрода могутъ быть замѣнены одинъ другимъ.

СИНХРОННЫЕ МОТОРЫ.

384. Подобно машинамъ постоянного тока, машины переменнаго тока, служащія генераторами, могутъ быть употребляемы также въ качествѣ моторовъ. Такой моторъ переменнаго тока представляетъ, однако, то неудобство, что, помимо переменнаго тока для кольца, доставляющаго энергію, преобразуемую въ работу, онъ требуетъ еще особаго тока постоянного напряженія для намагничивающихъ катушекъ; послѣднія поглощаютъ, впрочемъ, очень мало энергіи. Безъ спеціальнаго источника постоянного тока моторъ не можетъ дѣйствовать.

Но этого еще недостаточно. Пока подвижная часть мотора находится въ покоѣ, на нее въ каждый періодъ переменнаго тока дѣйствуютъ двѣ равныя и прямо противоположныя силы, которыя поэтому взаимно уничтожаются. Вслѣдствіе этого, моторъ переменнаго тока, въ противоположность моторамъ постоянного тока, не начинаетъ вращаться самостоятельно, но долженъ быть приведенъ въ движеніе внѣшней движущей силой. Въ этомъ отношеніи онъ сходенъ со многими двигателями, а именно съ газомоторами, бензиновыми моторами, моторами Дизеля: всѣ они должны быть пускаемы въ ходъ внѣшней силой. Но моторъ переменнаго тока отличается отъ названныхъ машинъ, которыя продолжаютъ идти сами, послѣ того какъ ихъ надлежащимъ образомъ приводятъ въ движеніе, тѣмъ, что онъ идетъ самъ только тогда, когда доведенъ до вполнѣ опредѣленнаго, свойственнаго ему числа оборотовъ, именно такого, которое онъ долженъ былъ бы имѣть, чтобы возбуждать въ качествѣ генератора переменное напряженіе того же числа періодовъ, какое имѣетъ питающій его переменный токъ. Вообще, при иномъ числѣ оборотовъ моторъ переменнаго тока не можетъ идти самостоятельно. Дѣйстви-

тельно, необходимо, чтобы обращение тока въ проволокахъ якоря совершалось все время въ тактъ съ обращеніемъ поля, пересѣкающаго проволоки якоря и образуемаго вращающимися относительно нихъ магнитными полюсами: только при этомъ условіи магнитное притяженіе, дѣйствующее на подвижную часть машины, можетъ все время быть направлено въ одну сторону. Если же темпъ обращеній тока отличается отъ темпа обращеній магнитнаго поля, то магнитная сила дѣйствуетъ то въ направленіи движенія, то въ противоположномъ направленіи, такъ что въ среднемъ она равняется нулю, какъ и въ случаѣ, когда моторъ находится въ состояніи покоя. Величина энергіи, превращаемой въ работу въ синхронно идущемъ моторѣ переменнаго тока, зависитъ отъ величины постоянной разности фазъ между переменнымъ токомъ въ якорѣ и магнитнымъ полемъ, образуемымъ вращающимися относительно якоря полюсами. Количество преобразуемой энергіи наиболѣе велико, когда переменное напряженіе, индуцируемое переменнымъ магнитнымъ полемъ въ проволокахъ якоря, совпадаетъ по фазѣ съ якорнымъ токомъ; если мы обозначимъ все напряженіе, индуцируемое въ обмоткѣ якоря, чрезъ V и якорный токъ — чрезъ J , то въ этомъ случаѣ преобразуемая энергія будетъ равна $U = J_{eff} \cdot V_{eff}$ ваттъ. Если вращающаяся часть идетъ нѣсколько впереди, такъ что токъ отстаетъ отъ напряженія на постоянную разность фазъ ϕ , то превращаемая энергія равняется $U = J_{eff} \cdot V_{eff} \cdot \cos \phi$ ваттъ. Съ уменьшеніемъ $\cos \phi$ соотвѣтственно уменьшается и движущая сила мотора. Какъ только мы уменьшимъ нагрузку мотора, подвижная часть смѣстится нѣсколько впередъ и установится подъ большей разностью фазъ ϕ , при которой дѣйствующая на эту часть магнитная сила вновь будетъ равна нагрузкѣ. Если пустить моторъ ненагруженнымъ, то уголъ ϕ будетъ близокъ къ 90° , и преобразуемая энергія $V_{eff} \cdot J_{eff} \cdot \cos \phi$ будетъ почти равна нулю. Такъ какъ при этомъ фаза магнитнаго поля полюсовъ также смѣщена на 90° относительно якорнаго тока, то магнитная движущая сила въ теченіе одной четверти періода дѣйствуетъ постоянно въ направленіи движенія, а въ слѣдующую четверть періода — въ противоположномъ направленіи, т.-е. въ среднемъ она, дѣйствительно, равна нулю. Если бы уголъ ϕ возрасталъ далѣе, то машина шла бы, какъ генераторъ, потребляя работу и давая электрическую энергію. При увеличеніи нагрузки она нѣсколько оттягиваетъ назадъ вращающуюся часть мотора, и ϕ уменьшается, пока снова не установится равновѣсіе. При этомъ слѣ-

дуетъ имѣть въ виду, что существуетъ определенный конечный максимумъ преобразуемой энергии; именно, $U_{max} = V_{eff} \cdot J_{eff}$ при $\varphi = 0$. Если нагрузка превышаетъ среднюю магнитную движущую силу, дѣйствующую при $\varphi = 0$, то моторъ перестаетъ быть синхроннымъ и тотчасъ же останавливается.

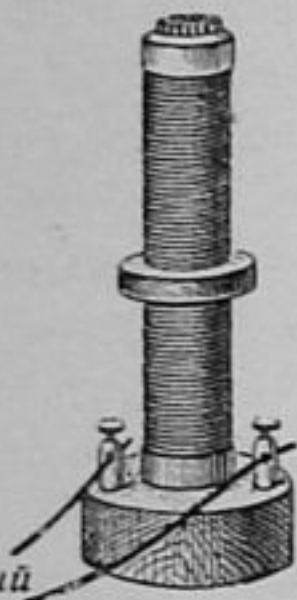
Если заставить обыкновенный генераторъ переменнаго тока идти въ качествѣ мотора, то онъ идетъ, какъ синхронный моторъ, т.-е. число его оборотовъ при всякой нагрузкѣ автоматически регулируется такъ, что оно равняется какъ разъ тому числу оборотовъ, съ которымъ должна была бы идти машина въ качествѣ генератора, чтобы возбуждать переменное напряженіе съ такимъ же числомъ періодовъ, какъ и подводимый къ ней переменный токъ.

Синхронный моторъ допускаетъ лишь определенную максимальную нагрузку; какъ только нагрузка превышаетъ этотъ предѣлъ, моторъ тотчасъ останавливается.

По принципу синхроннаго мотора можно неподвижно соединить черезъ большое разстояніе двѣ машины, генераторъ и моторъ, такимъ образомъ, что одна будетъ всегда вращаться такъ же, какъ и другая. Это свойство, конечно, можетъ имѣть громадное значеніе для извѣстныхъ специальныхъ случаевъ, но для обычнаго употребленія синхронные моторы не пригодны. Недостатки ихъ заключаются въ слѣдующемъ. Во-первыхъ, они требуютъ особаго источника постояннаго тока для магнитовъ; во-вторыхъ, они сами собою не начинаютъ идти, но необходимо посредствомъ внѣшней силы доводить ихъ до нормальнаго, довольно высокаго числа оборотовъ; въ-третьихъ, при случайной перегрузкѣ они тотчасъ же останавливаются. Техника переменнаго тока требуетъ такихъ машинъ, которыя были бы свободны отъ этихъ недостатковъ; необходимо, прежде всего, чтобы машина начинала идти сама и съ возможно большей двигательной силой. Такія машины должны быть, слѣдовательно, асинхронными моторами. Устройство этихъ асинхронныхъ моторовъ, конечно, должно быть совершенно отлично отъ устройства генераторовъ. Въ этомъ заключается отличіе передачи работы при помощи переменнаго тока отъ передачи, которая пользуется токомъ постояннымъ: генераторы и моторы постояннаго тока строятся одинаково.

АСИНХРОННЫЕ МОТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

385. Моторъ постоянного тока можно питать также переменнымъ токомъ. Такъ какъ при переменнѣ направленія тока обращаются намагниченіе якоря и полюсы магнитнаго индуктора, то направленіе двигательной силы, дѣйствующей на якорь, остается одинаковымъ въ теченіе обоихъ полуперіодовъ переменнаго тока, а именно такимъ же, какъ и при пользованіи постояннымъ токомъ. Для того, чтобы моторъ могъ быть питаемъ переменнымъ токомъ, желѣзные сердечники электромагнитовъ должны быть сдѣ-



Переменный токъ

Рис. 288. Опытъ съ отталкиваніемъ по Э. Томсону.

ланы изъ полосового желѣза, во избѣжаніе вихревыхъ токовъ. Нѣкоторыя затрудненія причиняетъ самоиндукція магнитныхъ катушекъ и якорной обмотки. Поэтому для переменнаго тока строятъ лишь моторы съ послѣдовательнымъ возбужденіемъ, въ которыхъ невозможны смѣщенія фазъ между магнитнымъ полемъ и якорнымъ токомъ, какъ въ моторахъ съ параллельнымъ возбужденіемъ. При питаніи мотора переменнымъ токомъ самоиндукція якорной обмотки весьма легко вызываетъ образованіе искръ на коллекторѣ; необходимо прилагать особыя старанія, чтобы этихъ искръ не было.

386. Особый моторъ переменнаго тока, питаемый не постояннымъ токомъ и все же идущій асинхронно, представляетъ

собою изобрѣтенный Э. Томсономъ (Elihu Thomson) репульсионный моторъ. Дѣйствіе его основано на своеобразномъ отталкиваніи, которое электромагнитъ переменнаго тока оказываетъ на замкнутыя металлическія кольца. Если металлическое кольцо для салфетки надвинуть на вертикальную катушку съ желѣзнымъ сердечникомъ (рис. 288) и положить на деревянное кольцо, находящееся на катушкѣ нѣсколько выше ея середины, то оно испытываетъ при прохожденіи переменнаго тока чрезъ катушку весьма сильное дѣйствіе, которое стремится вытолкнуть его вверхъ за предѣлы поля. Если кольцо не слишкомъ тяжело, то оно поднимается и остается висѣть въ

воздухъ подъ дѣйствиємъ силы переменнаго поля. Если внезапно замкнуть цѣпь переменнаго тока, то кольцо высоко подскакиваетъ. Это дѣйствіе вызывается индуктируемыми въ кольцо токами, которые противодѣйствуютъ намагничивающимъ токамъ въ катушкѣ, какъ мы видѣли въ § 370, и стремятся уничтожить магнитное поле. Кольцо для салфетки представляетъ собою соленоидъ, магнитная ось котораго — по крайней мѣрѣ, въ теченіе большей части періода переменнаго тока — направлена противоположно оси магнита переменнаго тока, и вслѣдствіе этого оно выталкивается изъ поля (ср. § 285). Если держать надъ магнитомъ переменнаго тока металлическое кольцо, которое можетъ вращаться вокругъ горизонтальной оси, то оно поворачивается такимъ образомъ, что плоскость его становится параллельной магнитнымъ силовымъ линіямъ. Вращающій моментъ, дѣйствующій на кольцо, имѣетъ максимумъ, когда плоскость кольца наклонена на 45° къ направленію поля. Этотъ вращающій моментъ примѣняется въ репульсионномъ моторѣ для производства работы.

Съ внѣшней стороны репульсионный моторъ почти вполне сходенъ съ моторомъ постояннаго тока съ барабаннымъ якоремъ, магнитный остовъ котораго сдѣланъ изъ полосового желѣза. Но въ репульсионномъ моторѣ магнитныя катушки и якорная цѣпь совершенно отдѣлены другъ отъ друга. Въ намагничивающія катушки пускаютъ переменный токъ. Наоборотъ, скользящія по коммутатору щетки коротко соединяются между собою и устанавливаются такъ, чтобы магнитная ось арматуры, при прохожденіи тока по ея обмоткѣ, составляла уголъ въ 45° съ полемъ магнитныхъ индукторовъ. Поэтому арматура получаетъ въ переменномъ полѣ подъ вліяніемъ индуктируемыхъ въ ней токовъ сильный вращающій моментъ. При вращеніи якоря уголъ, составляемый замкнутой на себя арматурной обмоткой съ магнитнымъ полемъ, остается неизмѣннымъ, что достигается съ помощью коммутатора; такимъ образомъ, якорь вращается подъ дѣйствиємъ постоянной силы. Описанный моторъ асинхрониченъ и идетъ съ большой движущей силой.

ВРАЩАЮЩИЯСЯ ПОЛЯ.

387. Въ общемъ ученіи о волнахъ такое колебаніе, которое имѣетъ, подобно обыкновенному переменному полю, одно характеристическое направленіе — именно, направленіе вектора поля, — называютъ прямолинейно поляризованнымъ. При сложеніи нѣсколь-

кихъ колебаній одинаковаго числа періодовъ получается результирующее колебаніе того же числа періодовъ; если при этомъ всѣ слагающіяся колебанія поляризованы параллельно между собой, то результирующее колебаніе также будетъ прямолинейно поляризованнымъ и имѣетъ то же самое направленіе поляризаціи. До сихъ поръ мы разсматривали исключительно такой случай, при чемъ сложеніе колебаній мы выполняли при помощи часовой діаграммы (§ 367).

Мы перейдемъ теперь къ разсмотрѣнію болѣе общаго случая, когда взаимно налагающіяся переменныя поля поляризованы различнымъ образомъ. Предположимъ сначала, что векторы полей составляютъ уголъ, равный 90° . Этотъ случай можно легко реализовать съ помощью двухъ катушекъ, расположенныхъ подъ прямымъ угломъ одна къ другой. Результирующее поле можно изслѣдовать съ помощью трубки Брауна, проходящей черезъ пространство въ углу,

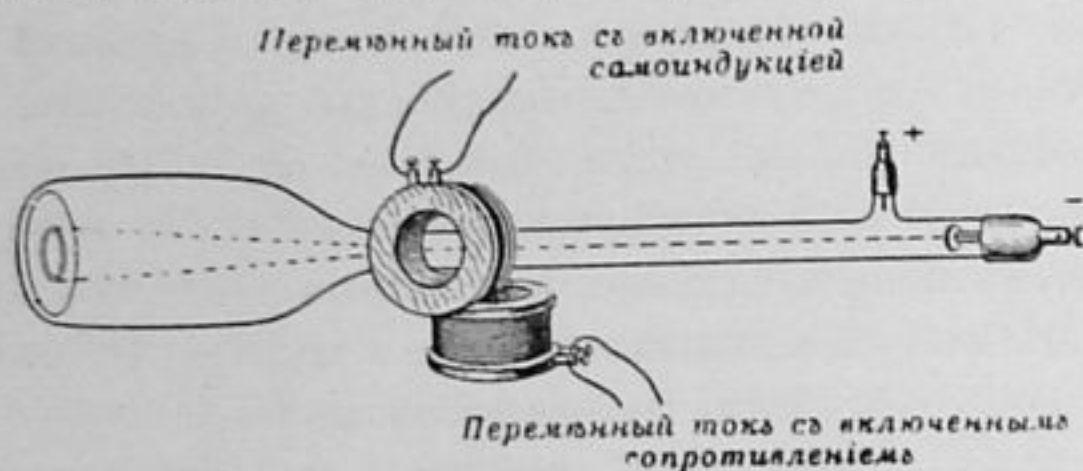


Рис. 289. Трубка Брауна во вращающемся полѣ.

образуемомъ катушками (рис. 289). Отклоненіе свѣтового пятна отъ нулевого положенія представляетъ собою векторъ, который въ точности перпендикуляренъ къ магнитному полю и по величинѣ пропорціоналенъ силѣ поля. Фигура, описываемая свѣтовымъ пятномъ при прохожденіи пучка катодныхъ лучей трубки Брауна черезъ переменное магнитное поле, ясно указываетъ, какъ поляризовано переменное поле. Если пропустить черезъ одну изъ двухъ катушекъ переменный токъ, то на экранѣ покажется прямая линія, описываемая быстро колеблющимся въ обѣ стороны свѣтовымъ пятномъ; поле, слѣдовательно, прямолинейно поляризовано, и длина небольшого свѣтящагося отрѣзка на экранѣ пропорціональна амплитудѣ переменнаго поля. Если пропустимъ переменный токъ лишь черезъ другую катушку, то на экранѣ опять появляется прямая линія, но перпендикулярная къ первой; въ этомъ случаѣ поле тоже поляри-

зовано прямолинейно, но перпендикулярно къ полю первой катушки. Теперь пропустимъ токъ одновременно черезъ обѣ катушки и устранимъ самоиндукцію въ вѣтвяхъ для того, чтобы оба тока совпали по фазѣ; на экранѣ появляется прямая линия, расположенная наклонно къ двумъ первымъ. Наши два поля слагаются въ переменное поле, наклонное къ нимъ и прямолинейно поляризованное. Если слагающіяся поля H_1 и H_2 всегда находятся въ одинаковой фазѣ, т.-е. если $H_1 = a \cdot \sin 2\pi nt$, $H_2 = b \cdot \sin 2\pi nt$, то уголъ α , образуемый результирующимъ полемъ H съ полемъ H_1 , будетъ постояннымъ, такъ какъ $\operatorname{tg} \alpha = H_2 : H_1 = b : a$ есть величина постоянная. Поэтому результирующее поле имѣетъ постоянное направление, т.-е. прямолинейно поляризовано. Если амплитуды обоихъ переменныхъ полей равны между собою, т.-е. $a = b$, то $\alpha = 45^\circ$. Но если существуетъ разность фазъ между H_1 и H_2 , то отношеніе $H_1 : H_2$ перестаетъ быть

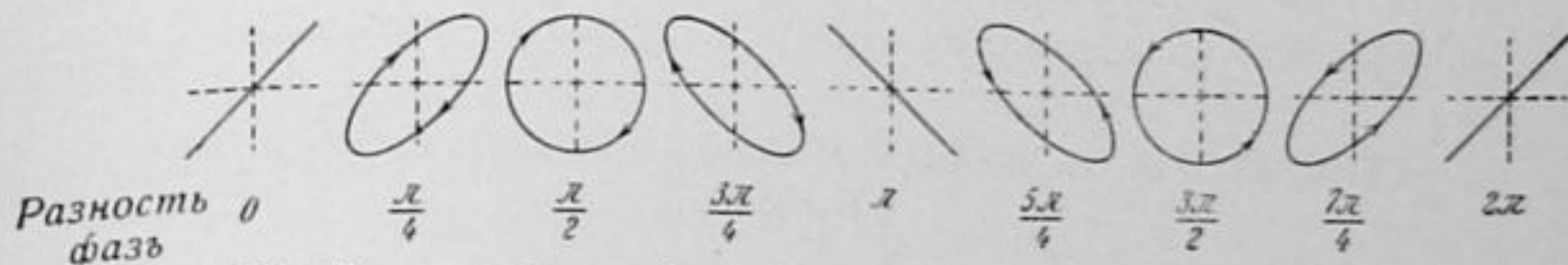


Рис. 290. Поляризация колебаній, образующихся при наложеніи двухъ взаимно перпендикулярно поляризованныхъ переменныхъ полей одинаковой амплитуды.

постояннымъ, α измѣняется втеченіе періода, и результирующее поле уже не будетъ прямолинейно поляризованнымъ. Если мы вызовемъ разность фазъ между магнитными полями, включивъ въ проводъ одной изъ катушекъ самоиндукцію, то на экранѣ трубки Брауна, вмѣсто прямой линіи, получается въ общемъ случаѣ эллипсъ. Если амплитуды обоихъ полей будутъ оставаться равными, а разность фазъ повысимъ до 90° (для этого въ цѣпь одной катушки нужно ввести лишь индуктивныя сопротивленія, а въ цѣпь другой — безъ-индукціонныя настоящія сопротивленія), то кривая на экранѣ будетъ окружностью. Дѣйствительно, по закону сложения векторовъ векторъ $H_1 = a \cdot \cos 2\pi nt$, съ перпендикулярнымъ къ нему векторомъ $H_2 = a \cdot \sin 2\pi nt$ даютъ въ суммѣ векторъ, величина котораго во всякой фазѣ будетъ $H = a$, и который составляетъ съ H_1 уголъ $2\pi nt$. Результирующее магнитное поле остается постояннымъ по величинѣ, и лишь его направление измѣняется періодически, при чемъ число оборотовъ равняется n . Подобное магнитное поле называется вращающимся

полемъ или же кругово поляризованнымъ колебаниемъ. Промежуточное положеніе между колебаніями, поляризованными прямолинейно и поляризованными по окружности, занимаютъ колебанія, поляризованныя по эллипсу. Послѣднія наблюдаются при вышеописанномъ опытѣ, когда амплитуды не равны между собою, или когда разность фазъ не равняется въ точности 90° (рис. 290).

При наложеніи двухъ переменныхъ полей, поляризованныхъ по взаимно перпендикулярнымъ направленіямъ и имѣющихъ одинаковыя амплитуды и разность фазъ, равную $\pi/2$, возникаетъ вращающееся поле, т.-е. колебаніе, поляризованное по окружности. При иныхъ разностяхъ фазъ и неодинаковыхъ амплитудахъ возникаетъ, вообще, колебаніе, поляризованное по эллипсу.

Переменные поля, наклоненныя другъ къ другу подъ острымъ угломъ, въ общемъ случаѣ также даютъ въ суммѣ эллиптически поляризованныя колебанія, а въ частныхъ случаяхъ — вращающіяся поля.

ГЕНЕРАТОРЫ СЪ ВРАЩАЮЩИМСЯ ПОЛЕМЪ И ПРОВОДКА КЪ НИМЪ.

388. Всякую машину переменнаго тока можно построить такъ, чтобы она давала нѣсколько переменныхъ токовъ съ различными фа-

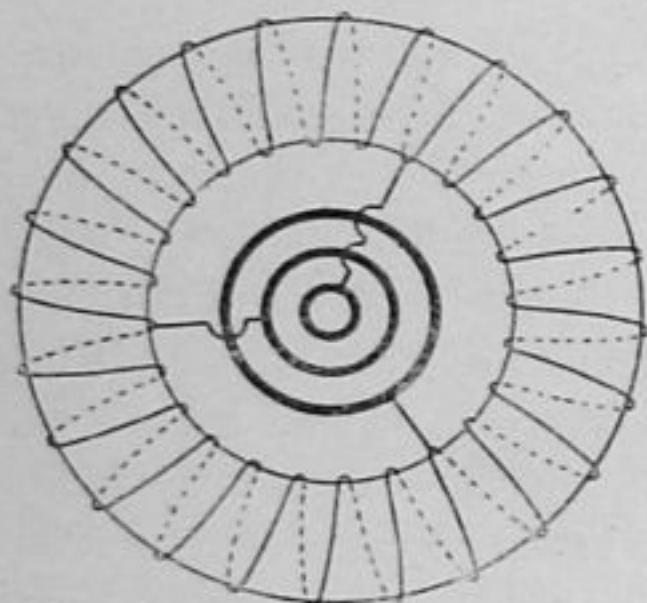


Рис. 291. Схема кольцевого якоря для двухфазнаго тока.

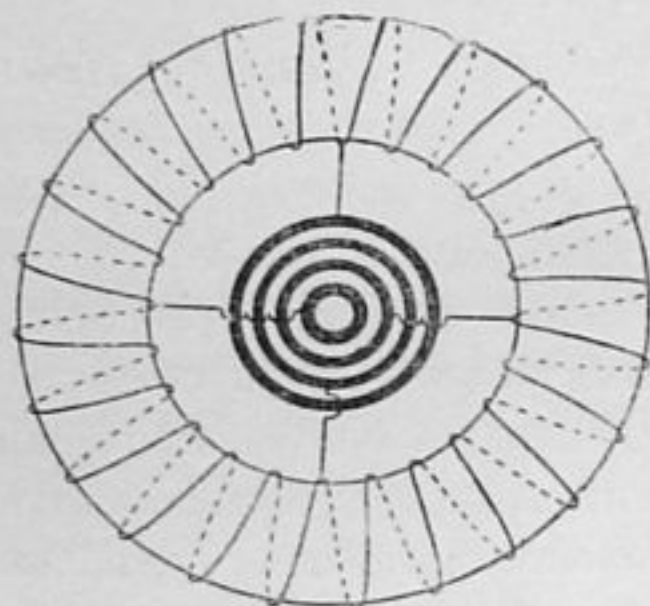


Рис. 292. Схема кольцевого якоря для трехфазнаго тока (т. н. соединеніе треугольникомъ).

зами. Напримѣръ, если обмотку кольцевого якоря двухполюсной машины снабдить (рис. 291) четырьмя отводящими проволоками на разстояніи 90° одна отъ другой, идущими къ четыремъ скользящимъ кольцамъ,

то между первой и третьей щетками получится обыкновенное переменное напряжение, какъ и между второй и четвертой, но напряжения обѣихъ паръ щетокъ будутъ взаимно смѣщены на четверть периода колебанія (разность фазъ $\pi/2$). Такой генераторъ, доставляющій два переменныя напряжения съ разностью фазъ $\pi/2$, называютъ двухфазнымъ генераторомъ. Если будемъ брать отъ него при помощи раздѣльныхъ проводовъ два переменныя тока, то съ помощью послѣднихъ можно прямо получить вращающееся поле. Двухфазный переменный токъ называютъ поэтому также вращающимъ токомъ или, точнѣе, двухфазнымъ вращающимъ токомъ; отдѣльные два переменныя тока, составляющіе вмѣстѣ двухфазный токъ, называются двумя фазами вращающаго тока.

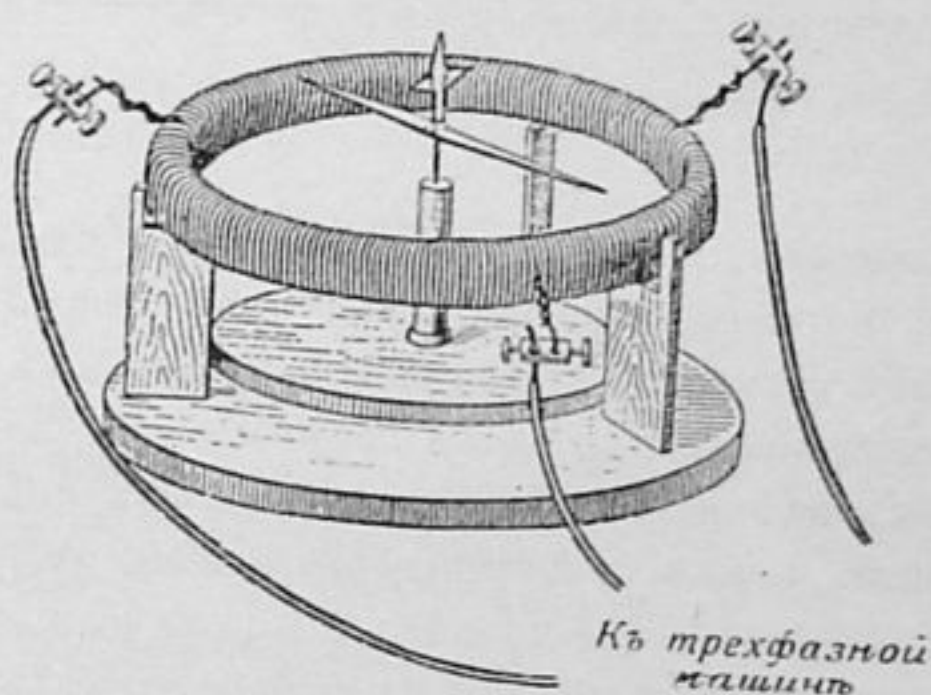


Рис. 293. Вращающееся поле въ трехфазномъ кольцевомъ магнитѣ.

На практикѣ болѣе важное значеніе имѣетъ трехфазный вращающій токъ. Если обмотку кольцевого якоря снабдить тремя отводящими проволоками, отстоящими одна отъ другой на 120° и идущими къ тремъ скользящимъ кольцамъ (рис. 292), то на каждой щеткѣ получится переменное напряжение относительно земли, причемъ три переменныя напряжения будутъ имѣть разности фазъ, равныя каждой $120^\circ = \frac{2\pi}{3}$. Если три зажима трехфазнаго генератора соединить посредствомъ проводовъ съ тремя точками обмотки неподвижнаго желѣзнаго кольца, отстоящими одна отъ другой на 120° (рис. 293), то внутри этого кольца возникаетъ вращающееся поле, изображеніе магнитнаго поля, вращающагося въ генераторѣ от-

носителю якоря. Если въ серединѣ кольца помѣстить магнитную стрѣлку, то вращающееся поле увлекаетъ ее за собою, и она вращается съ большою скоростью въ ту же сторону, какъ и поле.

Описанная трехфазная система характеризуется тѣмъ, что три катушки, къ которымъ присоединены три провода, образуютъ замкнутую фигуру. Такое соединеніе можно изобразить схематически, какъ на рис. 294; его называютъ „соединеніе треугольникомъ“.



Рис. 294. Схема соединенія треугольникомъ.

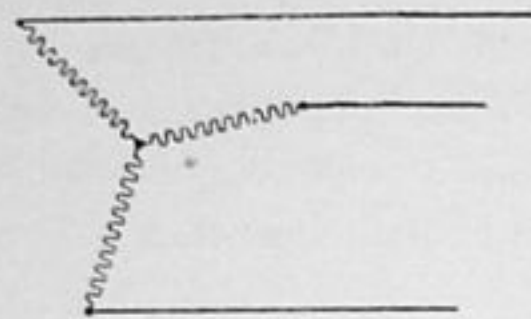


Рис. 295. Схема соединенія звѣздой.

Но можно также всѣ три катушки соединить съ одной стороны съ одной точкой, а три свободныхъ конца ихъ соединить съ тремя проводами, какъ схематически намѣчено на рис. 295. Такое соединеніе, представленное схематически также на рис. 296, называется „соединеніемъ звѣздой“. Последнее оказалось для генераторовъ болѣе пригоднымъ, нежели соединеніе треугольникомъ, и въ послѣднее время почти исключительно оно одно и употребляется. Во многихъ случаяхъ полезно присоединить еще къ средней точкѣ звѣзды выравнивающей проводъ, соединенный проводникомъ съ землею (рис. 297).

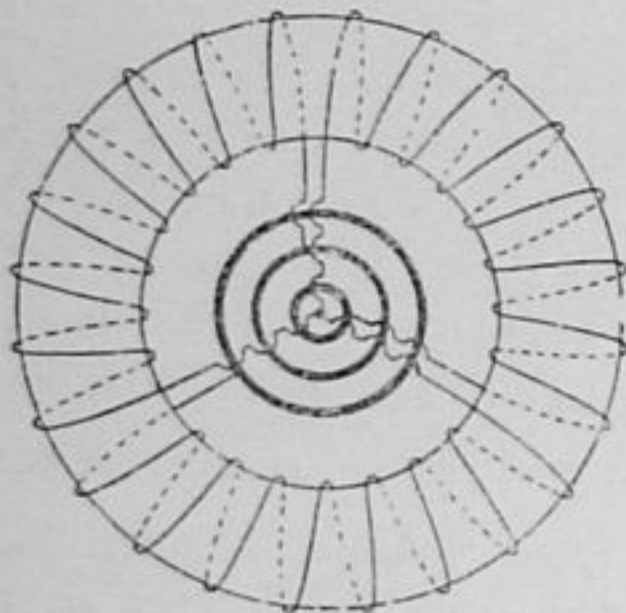


Рис. 296. Схема кольцевого якоря для мотора трехфазнаго тока (т. н. соединеніе звѣздой).

Онъ играетъ точно такую же роль, какъ выравнивающий проводъ въ трехпроводной системѣ постоянного тока (§ 365). Какъ тамъ имѣются двѣ независимыя половины, которыя должны быть нагружены по возможности равномерно, такъ и въ трехфазной системѣ съ выравнивающимъ проводомъ имѣются три независимыя участка переменнаго тока; въ каждый въ отдѣльности можно включить лампы, но они должны быть нагружены по

возможности равномерно, чтобы выравнивающий проводъ несъ лишь незначительный токъ. Кроме того, можно конечно, присоединить къ проводкѣ моторы какъ треугольникомъ, такъ и звѣздой. Эффектив-

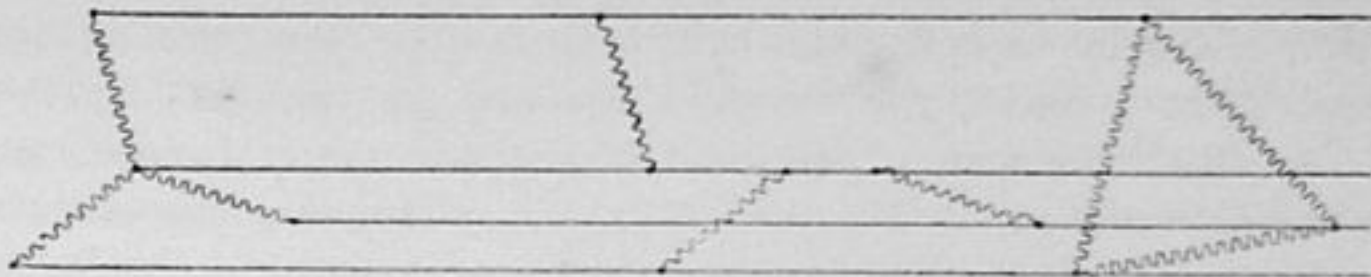


Рис. 297. Трехфазная система съ выравнивающимъ проводомъ.

ное напряжение между двумя внѣшними проводами въ 1,73 раза больше напряженія между внѣшнимъ и выравнивающимъ проводами; такимъ образомъ, потребитель получаетъ напряжение болѣе низкое

Вращающій токъ

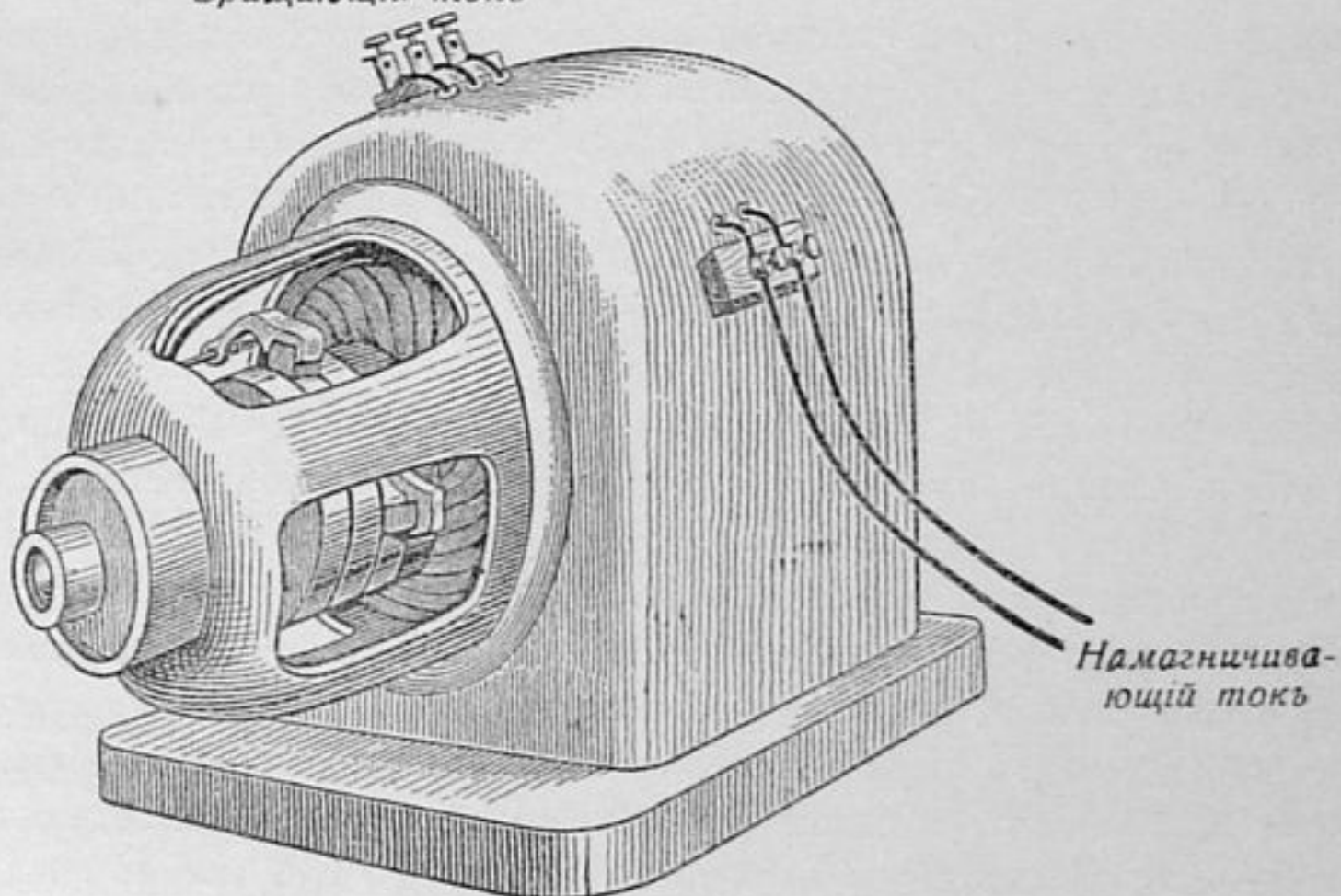


Рис. 298. Генераторъ трехфазнаго тока (машина съ внѣшними полюсами).

по сравненію съ тѣмъ, которое служитъ для переноса энергіи, какъ и при трехпроводной системѣ постоянного тока.

Генераторы вращающаго тока представляютъ собой генераторы переменнаго тока, и относительно нихъ ничего существеннаго нельзя прибавить къ тому, что было сказано въ § 369. Только

включеніе якорныхъ проволокъ должно быть произведено такимъ образомъ, чтобы получить три различныя фазы. На рис. 298 представленъ трехфазный генераторъ съ вращающимся якоремъ (слѣдовательно, машина съ внѣшними полюсами). Наружно онъ отличается отъ обыкновенной машины переменнаго тока лишь тѣмъ, что имѣеть три скользящія кольца, три щетки и три главные зажима.

Точно также и трансформаторы вращающаго тока ничѣмъ существенно не отличаются отъ трансформаторовъ переменнаго тока, описанныхъ въ § 378. Только вмѣсто двухъ магнитныхъ постановъ, видимыхъ на рис. 282, они должны имѣть три — по одному для каждой фазы. Катушки могутъ быть соединены между собою какъ треугольникомъ, такъ и звѣздой.

МОТОРЫ ВРАЩАЮЩАГО ТОКА.

389. Многофазный переменный токъ цѣнится въ технику особенно потому, что магнитными вращающимися полями можно приводить въ дѣйствіе простѣйшіе асинхронные моторы и, вообще, простѣйшіе изъ существующихъ электромоторовъ. Если изъ представленнаго на рис. 293 кольцевого магнита съ вращающимся полемъ удалить столикъ съ магнитной стрѣлкой и вмѣсто него ввести во вращающееся поле замкнутый проволочный прямоугольникъ, подвѣшенный отвѣсно на нити, или, еще лучше, барабанообразную клѣтку, составленную изъ нѣсколькихъ проволочныхъ прямоугольниковъ, то этотъ проводникъ начинаетъ быстро вращаться подобно магнитной стрѣлкѣ. Этотъ опытъ представляетъ собою не что иное, какъ обращеніе опыта Араго, описаннаго въ § 301. Въ коротко замкнутой клѣткѣ индуктируются электрическіе токи, стремящіеся задержать вращающееся поле. Магнитное поле этихъ индуктированныхъ токовъ во всякій моментъ перпендикулярно къ направленію вращающагося поля; вслѣдствіе этого результирующее поле все время отстаетъ отъ начальнаго вращающагося поля на постоянный уголъ. Такимъ образомъ, клѣтка представляетъ собою до нѣкоторой степени магнитъ, все время перпендикулярный къ вращающемуся полю и увлекаемый имъ съ постоянной силой во вращеніе въ одну съ нимъ сторону.

На рис. 299 представленъ моторъ вращающаго тока съ коротко замкнутымъ якоремъ въ видѣ бѣличьяго колеса. Якорь, называемый роторомъ, имѣеть барабанообразный желѣзный сердечникъ, входящій въ неподвижное магнитное кольцо съ вращающимся полемъ

—стойку, или статоръ, такъ что между ними остается лишь весьма узкое пространство; такимъ образомъ небольшимъ числомъ амперъ-витковъ вызывается сильное поле. Для большей ясности обѣ части мотора представлены на рисункѣ отдѣльно. Къ обмоткѣ статора ведутъ три провода для вращающаго тока; мѣдные стержни въ пазахъ ротора припаяны своими концами къ двумъ замкнутымъ мѣднымъ кольцамъ и, такимъ образомъ, являются коротко замкнутыми. Конечно, всѣ желѣзныя части какъ въ статорѣ, такъ и въ роторѣ, должны быть пластинчатыми.

Моторъ вращающаго тока съ коротко замкнутымъ якоремъ можно разсматривать, какъ особаго рода трансформаторъ. Обмотка

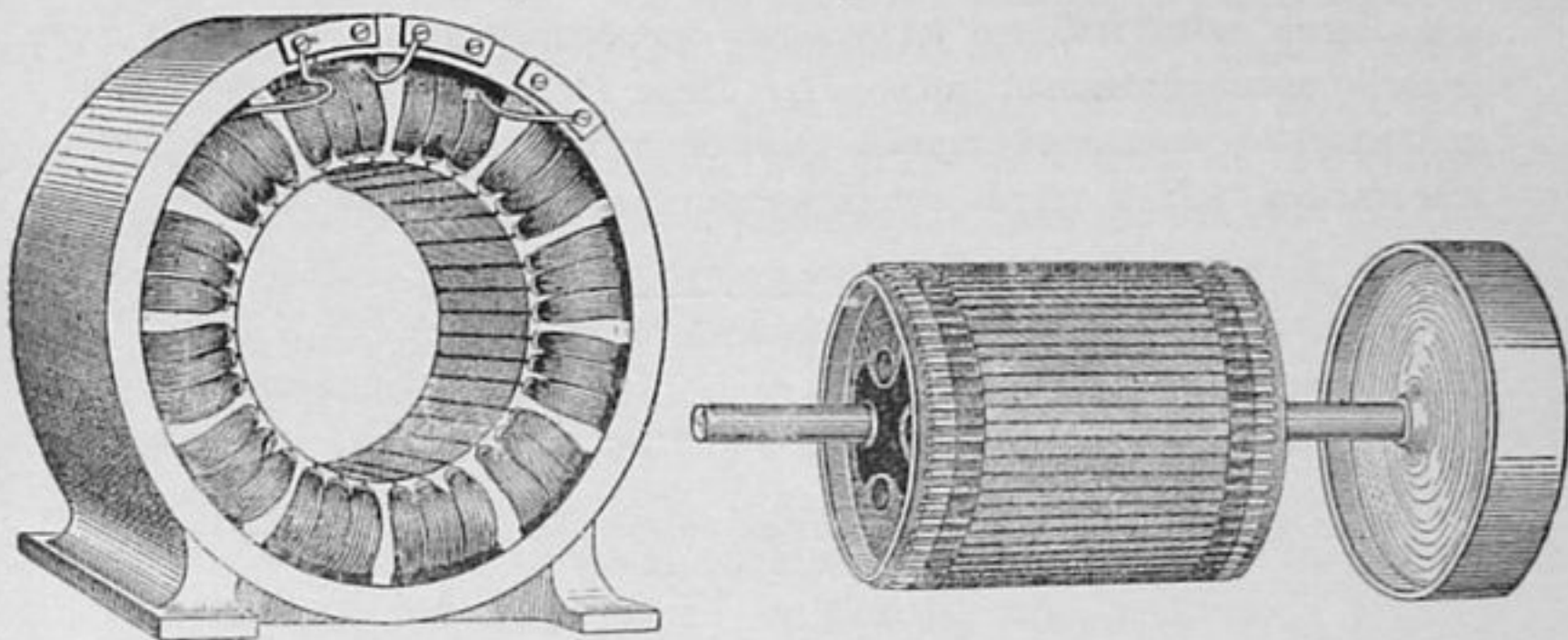


Рис. 299. Моторъ вращающаго тока съ коротко замкнутымъ якоремъ, представленнымъ отдѣльно. (Подшипники на рисункѣ не изображены).

статора представляетъ собою его первичную обмотку, обмотка ротора—вторичную. Амперъ-витки вращающагося магнитнаго поля слагаются изъ амперъ-витковъ статора и ротора. Но, если можно пренебречь потерями напряженія вслѣдствіе омическаго сопротивленія въ моторѣ, амплитуда поля, какъ въ трансформаторѣ, однозначно опредѣляется напряженіемъ между подводщими зажимами, которое при сдѣланномъ предположеніи одно должно преодолѣвать сопротивленіе инерціи магнитнаго поля его непрерывному измѣненію. Величина H для вращающагося поля, опредѣляемая напряженіемъ между зажимами, представлена на часовой діаграммѣ (рис. 300) стрѣлкой OA . Если стрѣлка OA будетъ вращаться со скоростью вращающагося поля, то она сама (а не ея проекція на ось, какъ въ случаѣ

прямолинейно поляризованнаго переменнаго поля) будетъ представлять вращающееся поле. По законамъ индукціи токи J_A , индуцированные въ коротко замкнутомъ якорѣ, должны идти такимъ образомъ, чтобы ихъ поле H_2 было перпендикулярно къ полю H , представленному на рис. 300 векторомъ OB . Якорные токи дѣйствуютъ, подобно вторичному току въ трансформаторѣ, на силу тока въ обмоткѣ статора такимъ образомъ, что поле H_1 , которое вызывали бы сами по себѣ амперъ-витки статора, вмѣстѣ съ H_2 даетъ по правилу сложения векторовъ имѣющееся въ дѣйствительности вращающееся поле H , опредѣляемое напряженіемъ между зажимами. На рис. 300 поле H_1 представлено векторомъ OC .

Легко показать, что количество преобразующейся въ моторѣ энергіи пропорціонально полю H_2 . Поле H_1 можно разложить на двѣ взаимно перпендикулярныя слагающія, изъ которыхъ одна тождественна съ H , а другая равна и противоположна полю H_2 . Соот-

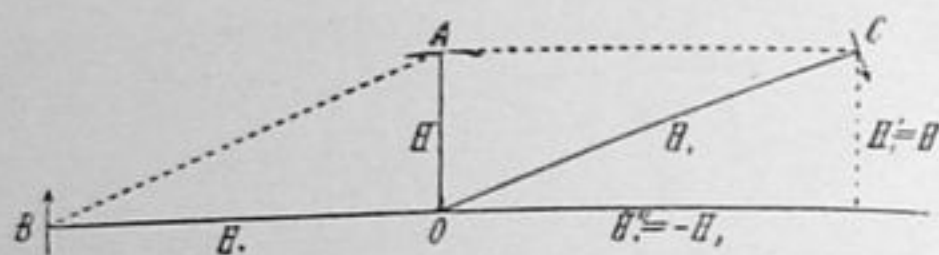


Рис. 300. Часовая діаграмма мотора вращающаго тока съ коротко замкнутымъ якоремъ.

вѣтственно этому можно каждый изъ трехъ переменныхъ токовъ въ обмоткѣ статора разложить на двѣ слагающія съ разностью фазъ $\frac{\pi}{2}$; одна изъ нихъ J' вызываетъ поле H_1 , другая J'' — поле $-H_2$. Если бы въ якорѣ не было вовсе тока, т.-е. если бы $H_2 = 0$, то слагающей J'' не существовало бы. Въ этомъ случаѣ вращающая сила, дѣйствующая на якорь, равнялась бы нулю, и моторъ не отдавалъ бы вовсе энергіи въ формѣ работы, а, слѣдовательно, и не поглощалъ бы электрической энергіи. Поэтому разность фазъ между токомъ J' въ каждомъ изъ трехъ проводовъ и напряженіемъ провода относительно земли равна $\frac{\pi}{2}$, такъ что переносимая энергія является то положительной, то отрицательной, а для всѣхъ трехъ проводовъ вмѣстѣ всегда равна нулю. Такъ какъ токъ J'' въ каждомъ проводѣ смѣщенъ по фазѣ на 90° относительно J' , то J'' совпадаетъ по фазѣ съ напряженіемъ, и энергія, вступающая въ

моторъ, равняется утроенному произведенію изъ эффективной величины силы тока въ проводъ J'' на эффективную величину напряженія этого провода относительно земли. Но значеніе J'' пропорціонально полю H_2 , и напряженіе между зажимами постоянно; слѣдовательно, величина преобразуемой энергіи пропорціональна величинѣ H_2 .

Съ другой стороны сила тока J_A въ коротко замкнутой обмоткѣ ротора, число амперъ-витковъ которой мы обозначили черезъ H_2 , равняется частному отъ дѣленія электродвижущей силы на сопротивление. Индуктированная электродвижущая сила въ каждомъ отдѣльномъ стержнѣ якорной обмотки состоитъ изъ двухъ слагающихъ — напряженія во вращающемся магнитномъ полѣ, обусловливающаго непрерывное измѣненіе поля, и электродвижущей силы магнитнаго поля, силовыя линіи котораго пересѣкаются стержнемъ вслѣдствіе вращенія якоря. Эти двѣ электродвижущія силы направлены въ противоположныя стороны; мы обозначимъ ихъ соотвѣтственно черезъ V_0 и $-V_1$. По закону относительности индукціонныхъ дѣйствій результирующая электродвижущая сила ($V = V_0 - V_1$) имѣетъ такую величину, какъ если бы роторъ оставался неподвижнымъ и поле вращалось съ относительной скоростью $u_0 - u_1$, гдѣ u_0 — скорость вращенія поля, u_1 — скорость вращенія якоря, и $u_0 = 2\pi n$ (n — число періодовъ переменнаго тока). Мы имѣемъ, слѣдовательно,

$$V = V_0 \cdot \frac{u_0 - u_1}{u_0}.$$

При этомъ электродвижущая сила V_0 опредѣляется напряженіемъ между зажимами, а величина V , а, слѣдовательно, и якорный токъ, т.-е. H_2 , пропорціональны частному $\frac{u_0 - u_1}{u_0}$.

Частное отъ дѣленія скорости $u_0 - u_1$ вращенія поля относительно ротора на абсолютную скорость вращенія поля u_0 , т.-е. отношеніе $\frac{u_0 - u_1}{u_0}$, называется скольженіемъ мотора вращающаго тока.

Скольженіе обычно выражаютъ въ процентахъ. Если, напримеръ, $\frac{u_0 - u_1}{u_0} = 0,02$, то говорятъ, что скольженіе составляетъ 2%.

Изъ вышеприведенныхъ соображеній слѣдуетъ, что электрическая энергія, преобразуемая въ моторѣ, при постоянномъ

напряженіи между зажимами пропорціональна скольженію. Напримѣръ, если скольженіе равняется нулю, то $u_0 = u_1$, поле находится въ покоѣ относительно ротора, никакихъ токовъ, слѣдовательно, вовсе не индуцируется, и преобразуемая энергія равняется нулю.

Величина скольженія вліяетъ также и на потерю энергіи въ моторѣ. Если сила тока въ якорной проволоцѣ равна J_A , величина напряженія вдоль нея равняется V_0 и электродвижущая сила пересѣкаемаго ею магнитнаго поля есть V_1 , то, по теоремѣ Пойнтинга, вся доставляемая ей энергія равняется $V_0 \cdot J_A$ ваттъ. Согласно сказанному въ § 294, изъ этого количества лишь часть $V_1 \cdot J_A$ передается далѣе въ видѣ работы, величина же $(V_0 - V_1) \cdot J_A$ представляетъ собою теплоту тока. Отношеніе потери энергіи ко всей энергіи равняется, слѣдовательно, $(V_0 - V_1) : V_0 = (u_0 - u_1) : u_0$, т.-е. скольженію. Величина скольженія непосредственно даетъ въ процентахъ ту часть доставляемой энергіи, которая теряется въ роторѣ въ видѣ теплоты тока. Подобную же величину имѣетъ и потеря энергіи въ статорѣ. Если желательно хорошо использовать моторъ, то полезный токъ J'' долженъ быть, какъ и въ трансформаторѣ, великъ по сравненію съ намагничивающимъ токомъ J' . Потеря энергіи въ обмоткѣ статора вслѣдствіе образования теплоты тока, пропорціональная количеству $J_{eff}^2 = J'_{eff}^2 + J''_{eff}^2$, можетъ быть съ большимъ приближеніемъ принята пропорціональной количеству J''_{eff}^2 , а вся доставляемая мотору энергія — пропорціональной J'_{eff} , какъ мы видѣли выше. Отношеніе этихъ двухъ величинъ, т.-е. процентное количество теряемой энергіи, будетъ поэтому приблизительно пропорціонально J''_{eff} или, что то же, пропорціонально скольженію. Въ общемъ, слѣдовательно, потеря энергіи въ моторѣ, вычисленная въ процентахъ подводимой энергіи, является кратной скольженія. Для того, чтобы моторъ работалъ экономно, скольженіе не должно прерывать небольшого числа процентовъ.

Скольженіе зависитъ всецѣло отъ нагрузки, т.-е. отъ движущей силы, дѣйствующей на роторъ. Дѣйствительно, вращающее поле H , вызываемое напряженіемъ между зажимами, дѣйствуетъ на роторъ съ силой, пропорціональной силѣ тока въ коротко замкнутой обмоткѣ, т.-е. пропорціональной скольженію. Если увеличить нагрузку мотора, то число оборотовъ немного уменьшится, пока скольженіе не возрастетъ настолько, что магнитная движущая сила будетъ вновь уравновѣшивать нагрузку. Энергія, отдаваемая въ видѣ

работы, равняется произведенію изъ вращающаго момента, дѣйствующаго на роторъ, на скорость вращенія. Такъ какъ послѣдняя приблизительно постоянна, именно, равна приблизительно скорости вращающагося поля, то энергія, отдаваемая въ видѣ работы, приблизительно пропорціональна вращающему моменту, т.-е. скольженію. Мы выше доказали, что преобразуемая въ моторѣ энергія въ точности пропорціональна скольженію. Получаемая работа нѣсколько меньше, такъ какъ скорость вращенія якоря вслѣдствіе скольженія нѣсколько меньше скорости вращенія магнитнаго поля. Разность между этими скоростями въ точности соотвѣтствуетъ потерѣ энергіи въ коротко замкнутомъ якорѣ. Къ этому присоединяется еще потеря энергіи въ обмоткѣ статора, связанная съ потерей напряженія и, слѣдовательно, съ уменьшеніемъ вращающагося поля H , вслѣдствіе чего движущая сила ротора и энергія, отдаваемая въ видѣ работы, нѣсколько уменьшаются.

Пока моторъ вращающаго тока съ коротко замкнутымъ якоремъ работаетъ экономно, скольженіе мало, т.-е. моторъ идетъ съ почти постояннымъ числомъ оборотовъ; энергія, преобразующаяся въ моторѣ, и движущая сила пропорціональны скольженію; процентное количество энергіи, теряющейся въ видѣ теплоты тока, является кратнымъ скольженія.

Мы рассмотримъ теперь вопросъ о пускѣ мотора въ ходъ. Моторъ начинаетъ идти, конечно, съ весьма большимъ скольженіемъ, достигающимъ въ первый моментъ 100%. Для движущей силы это обстоятельство весьма неблагоприятно. Дѣйствительно, когда скольженіе превышаетъ нѣсколько процентовъ, то въ правильно конструированномъ моторѣ сила тока въ коротко замкнутомъ якорѣ и потому также въ обмоткѣ магнита становится столь большой, что вызываетъ очень сильныя потери напряженія. Чтобы получить величину напряженія, идущаго на образованіе вращающаго поля, эту потерю нужно вычесть изъ напряженія между зажимами. Но если напряженіе убываетъ, то вращающееся поле ослабѣваетъ, и вслѣдствіе этого при увеличеніи скольженія движущая сила перестаетъ возрастать, несмотря на увеличеніе силы тока въ якорныхъ проволокахъ. При опредѣленной большой величинѣ скольженія движущая сила достигаетъ максимума и затѣмъ понижается. Такимъ образомъ, при пускѣ мотора имѣется движущая сила, но лишь малая. Въ малыхъ

моторахъ съ этимъ обстоятельствомъ мирятся, чтобы сохранить ихъ крайне простую конструкцію. Такъ какъ малый моторъ не имѣетъ вовсе скользящихъ контактовъ, то его можно цѣликомъ заключить въ футляръ, изъ котораго выдается лишь ось съ ременнымъ шкивомъ, и на которомъ находятся три зажима для вращающаго тока статора.

Въ большихъ моторахъ, строящихся для полученія очень большой отдачи при нормальномъ числѣ оборотовъ, съ этимъ обстоятельствомъ мириться невозможно. Дѣйствительно, въ нихъ токи при пускѣ мотора въ ходъ могутъ стать настолько большими, что обмоткѣ будетъ грозить опасность перегорѣть, и при этомъ, вслѣдствіе колоссальной потери напряженія, магнитное поле становится настолько слабымъ, что движущая сила очень мала. Поэтому приходится пользоваться пусковымъ сопротивленіемъ. Послѣднее не слѣдуетъ включать передъ намагничивающими катушками статора, потому что это вызывало бы такое повышеніе потери напряженія, что движущая сила въ концѣ концовъ почти уничтожилась бы. Чтобы имѣть возможность ввести пусковое сопротивление въ обмотку ротора, нужно рѣшиться пожертвовать преимуществомъ простаго коротко замкнутаго якоря малыхъ моторовъ. Якорные стержни соединяютъ, какъ и въ генераторѣ вращающаго тока, „звѣздою“ въ три группы, каждая изъ которыхъ соединяется со скользящимъ кольцомъ. Отъ трехъ щетокъ идутъ провода къ тремъ сопротивленіямъ, концы которыхъ соединены между собою по способу звѣзды и такимъ образомъ замыкаютъ якорную обмотку. Сопротивленіе вычисляется такъ, чтобы якорный токъ, въ который оно при пускѣ вначалѣ включено полностью, возрасталъ лишь до благопріятной величины, при которой потери напряженія въ катушкахъ статора не слишкомъ велика. Такимъ образомъ возбуждается сильное вращающее поле, и моторъ идетъ съ весьма большой движущей силой. По мѣрѣ того, какъ онъ приходитъ въ движеніе, сопротивление постепенно выключается помощью рукоятки, такъ чтобы съ достиженіемъ нормальнаго числа оборотовъ якорныя проволоки были коротко замкнуты. Тогда хорошія экономныя свойства мотора проявляются во всей своей силѣ.

Моторъ вращающаго тока близокъ къ идеалу мотора; онъ характеризуется слѣдующими свойствами.

1. Онъ выноситъ очень сильныя колебанія въ нагрузкѣ; его движущая сила и продуктивность легко могутъ превысить въ нѣсколько разъ нормальную величину (наиболѣе экономную).

2. Число оборотовъ его измѣняется едва замѣтно, всего на нѣсколько процентовъ, такъ какъ движущая сила и продуктивность возрастаютъ приблизительно пропорціонально скольженію.

3. Онъ пускается въ ходъ съ большой движущей силой, если имѣеть пусковое сопротивленіе для ротора.

4. Уходъ за нимъ чрезвычайно простъ, и онъ имѣеть очень простую конструкцію.

5. По сравненію со своей продуктивностью онъ очень малъ — меньше всякаго другого мотора.

390. Нѣкоторое затрудненіе можно было бы усмотрѣть въ томъ, что мы связаны опредѣленной скоростью вращенія. Такъ какъ принятое повсемѣстно въ Европѣ число періодовъ переменнаго тока равняется 50 въ секунду, то роторъ мотора вращающаго тока съ простымъ вращающимся полемъ долженъ дѣлать приблизительно 50 оборотовъ въ секунду. Это число слишкомъ велико, и его необходимо было бы перевести на практически удобныя скорости. Но дѣлу можно помочь, увеличивъ число полюсовъ статора. Простое вращающееся поле получается съ тремя полюсами, фазы которыхъ отличаются одна отъ другой на 120° . Моторъ, изображенный на рис. 299, вмѣсто этого имѣеть $4 \cdot 3 = 12$ полюсовъ. Подобно тому, какъ генераторъ переменнаго тока съ v парами полюсовъ долженъ дѣлать лишь $50 : v$ оборотовъ въ секунду, чтобы число періодовъ равнялось 50, точно такъ-же и моторъ вращающаго тока съ v тройками полюсовъ долженъ дѣлать нормально $50 : v$ оборотовъ въ секунду, если не принимать въ расчетъ скольженія (напримѣръ, для мотора на рис. 299 $50 : 4 = 12\frac{1}{2}$ оборотовъ). Это можно себѣ представлять такимъ образомъ, какъ будто вращающееся поле въ теченіе одного періода всегда передвигается на одну тройку полюсовъ. Хотя поле многополюснаго статора уже не является такимъ простымъ вращающимся полемъ, какъ поле одной тройки полюсовъ, однако теорія многополюсныхъ моторовъ вращающаго тока ни въ чемъ существенномъ не отличается отъ теоріи простого трехполюснаго мотора, и результаты, полученные нами для этого простого мотора, вѣрны для всякаго мотора вращающаго тока съ коротко-замкнутымъ якоремъ.

391. Превосходныя свойства моторовъ вращающаго тока много способствовали распространенію передачи энергіи помощью переменныхъ токовъ, въ частности многофазныхъ переменныхъ токовъ. Возможность такихъ установокъ переменнаго тока была впервые показана

въ 1891 году на франкфуртской электротехнической выставкѣ. На этой выставкѣ фирма Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft вмѣстѣ съ машинной фабрикой Oerlikon устроила знаменитую первую передачу энергіи — изъ Лауффена на Неккарѣ во Франкфуртъ на Майнѣ. Трехфазный генераторъ приводился въ движеніе турбиной въ Лауффенѣ. Напряжение сейчасъ же повышалось трансформаторомъ до 8000 вольтъ (напряжение между проводомъ и землею). Такимъ образомъ можно было мощность приблизительно въ 150 PS переносить во Франкфуртъ, на разстояніе 175 километровъ, при помощи трехъ тонкихъ мѣдныхъ проволокъ (4 мм. толщины каждая). Отдача установки была равна приблизительно 75%, такъ какъ въ Лауффенѣ турбина давала около 200 PS. Эта первая, сравнительно небольшая установка вращающаго тока вызвала громадное распространеніе электрической передачи силы. Въ горныхъ мѣстностяхъ, богатыхъ водостоками, каковы, на примѣръ, Альпы, цѣлыя провинціи съ деревнями, городами и фабриками снабжаются энергіей при помощи переменнаго тока отъ одной или немногихъ водопадныхъ центральныхъ станцій; мощность при этомъ часто достигаетъ многихъ тысячъ лошадиныхъ силъ.

ОДНОФАЗНЫЙ МОТОРЪ СЪ ВРАЩАЮЩИМСЯ ПОЛЕМЪ.

392. Принципомъ мотора вращающаго тока пользуются также для построения однофазныхъ моторовъ переменнаго тока. Вообще говоря, коротко замкнутый якорь не можетъ придти во вращеніе въ прямолинейно поляризованномъ переменномъ полѣ: это противорѣчило бы симметріи поля. Если же привести его во вращеніе посторонней силой и довести число оборотовъ приблизительно до 50 въ секунду, то переменное поле будетъ поддерживать его движеніе, и моторъ будетъ имѣть очень большую движущую силу, какъ настоящий моторъ вращающаго тока.

Изъ законовъ индукціи слѣдуетъ, что въ обмоткѣ вращающагося коротко замкнутаго якоря индуктируются токи, стремящіеся по возможности препятствовать измѣненіямъ магнитнаго поля во вращающемся якорѣ. Если якорь вращается въ тактъ съ переменнымъ токомъ, т.-е. если число его оборотовъ точно равно числу періодовъ переменнаго тока, то возникаетъ почти совершенное вращающееся поле, неизмѣнно вращающееся съ якоремъ. Въ этомъ случаѣ въ обмоткѣ якоря индуктируются токи, которые смѣщены относительно

переменнаго магнитнаго поля статора на фазу $\frac{\pi}{2}$ и магнитное поле которыхъ всегда перпендикулярно къ полю статора и имѣетъ одинаковую съ нимъ силу. Такимъ образомъ получается поле двуфазнаго тока, гдѣ якорь играетъ роль одной пары полюсовъ. Электродвижущія силы, дѣйствующія въ проволочныхъ виткахъ якоря при ихъ вращеніи въ переменномъ магнитномъ полѣ статора, какъ разъ уравниваютъ напряжения, необходимыя для возбужденія въ якорѣ поперечнаго переменнаго поля. Потеря напряжения вслѣдствіе сопротивленія коротко замкнутой якорной обмотки безконечно мала въ сравненіи съ дѣйствіями инерціи магнитнаго поля, и ею можно пренебречь: она влечетъ за собою лишь безконечно малое смѣщеніе фазъ и такое же ослабленіе поперечнаго магнитнаго поля. Точно такъ же напряжения, вызываемыя измѣненіями магнитнаго поля статора, уравниваются электродвижущими силами, которыя поперечное магнитное поле индуцируетъ въ якорныхъ проволокахъ при ихъ движеніи въ немъ. Вслѣдствіе упомянутаго выше безконечно малаго вліянія потерь напряжения въ якорныхъ проволокахъ на поперечное поле получается небольшая разница между обѣими силами. Но вызываемый вслѣдствіе этого небольшой токъ, поле котораго должно быть параллельно полю статора, компенсируется совершенно такъ же, какъ въ трансформаторѣ переменнаго тока, слагающей переменнаго тока, въ обмоткѣ статора имѣющей то же число амперъ-витковъ, но противоположное направленіе. Такимъ образомъ, этотъ токъ никакого вліянія на поле не оказываетъ. Если пренебречь небольшими потерями энергіи въ проволокахъ, происходящими вслѣдствіе образованія теплоты тока, то въ моторѣ, идущемъ строго въ тактъ, совершенно не происходитъ преобразованія энергіи. Но если скорость вращенія якоря u_1 нѣсколько меньше скорости вращающагося поля u_0 иначе говоря, когда скольженіе якоря равняется $\frac{u_0 - u_1}{u_0}$, то электродвижущая сила, дѣйствующая на проволоки якоря вслѣдствіе ихъ движенія въ переменномъ полѣ статора, а, слѣдовательно, и поперечное магнитное поле якоря, въ конечномъ счетѣ вызываемое этой электродвижущей силой, будетъ меньше переменнаго поля статора въ отношеніи $u_1 : u_0$. Напряженія, вызываемыя измѣненіями поля статора, уже не уравниваются электродвижущими силами, дѣйствующими въ якорныхъ проволокахъ вслѣдствіе ихъ движенія въ поперечномъ магнитномъ полѣ. Послѣднія слишкомъ малы по двумъ причинамъ:

во-первыхъ, поперечное поле уменьшено въ отношеніи $\frac{u_1}{u_0}$, во-вторыхъ, скорость уменьшена въ отношеніи $\frac{u_1}{u_0}$. Электродвижущая сила V_1 поперечнаго поля, слѣдовательно, относится къ переменному электрическому напряженію V_0 , какъ u_1^2 къ u_0^2 . Поэтому въ коротко замкнутыхъ якорныхъ виткахъ, сопротивленіе которыхъ ничтожно мало, долженъ возникнуть сильный переменный токъ, сила котораго, по закону Ома, пропорціональна разности между электрическимъ напряженіемъ и электродвижущей силой поперечнаго поля, т.-е. пропорціональна величинѣ

$$V_0 - V_1 = V_0 \cdot \left(1 - \frac{u_1^2}{u_0^2}\right) = V_0 \cdot \frac{u_0^2 - u_1^2}{u_0^2} = V_0 \cdot \frac{u_0 + u_1}{u_0} \cdot \frac{u_0 - u_1}{u_0}.$$

Если скольженіе очень мало, то величина $V_0 - V_1$ приблизительно равняется

$$V_0 \cdot 2 \cdot \frac{u_0 - u_1}{u_0},$$

т.-е. при данномъ переменномъ напряженіи токъ почти пропорціоналенъ скольженію. Этотъ токъ, поле котораго параллельно статору, не оказываетъ никакого вліянія на вращающееся поле, такъ какъ одновременно въ обмоткѣ статора должна возникать компенсирующая его слагающая переменнаго тока. Легко видѣть, что эта компенсирующая слагающая имѣетъ относительно намагничивающаго тока статора разность фазъ, равную $\frac{\pi}{2}$, и совпадаетъ по фазѣ съ переменнымъ напряженіемъ между подводными токъ зажимами. Слѣдовательно, преобразуемая въ моторѣ энергія пропорціональна ей. Такъ какъ соотвѣтствующій переменный токъ въ якорѣ также совпадаетъ по фазѣ съ поперечнымъ магнитнымъ полемъ якоря, то движущая сила, съ которою дѣйствуетъ на якорь магнитное поле также пропорціональна полю. Отсюда вытекаетъ слѣдующее предположеніе:

Энергія, преобразуемая въ однофазномъ моторѣ съ вращающимся полемъ, и движущая сила его якоря пропорціональны скольженію якоря при условіи, что послѣднее мало.

Еще въ другомъ отношеніи теорія такого однофазнаго мотора весьма сходна съ теоріей настоящаго мотора вращающаго тока.

Процентная потеря энергии въ якорныхъ проволокахъ равняется удвоенному скольженію, а потеря во всемъ моторѣ больше скольженія въ нѣсколько разъ. Однофазный моторъ съ вращающимся полемъ только тогда работаетъ экономно, когда скольженіе не превышаетъ нѣсколькихъ процентовъ.

Существенное различіе между однофазнымъ моторомъ съ вращающимся полемъ и моторомъ вращающаго тока заключается въ томъ, что въ первомъ одна фаза вращающагося поля, именно поперечное поле якоря, развивается тѣмъ слабѣе, чѣмъ меньше скорость вращенія якоря. При уменьшеніи числа оборотовъ поле становится поляризованнымъ по все болѣе и болѣе вытянутому эллипсу и, наконецъ, при неподвижномъ якорѣ становится поляризованнымъ прямолинейно. Вслѣдствіе этого движущая сила, имѣющая максимумъ, какъ при опредѣленномъ числѣ оборотовъ въ моторѣ вращающаго тока, съ уменьшеніемъ скорости вращенія падаетъ значительно быстрѣе, чѣмъ въ моторѣ вращающаго тока, и при неподвижномъ якорѣ равняется нулю. Однофазный моторъ не начинаетъ идти самостоятельно и при нагрузкѣ, превосходящей максимумъ его движущей силы, окончательно останавливается. Однако, онъ менѣе удобенъ, чѣмъ синхронный моторъ, такъ какъ, во-первыхъ, число оборотовъ, съ которымъ его пускаютъ въ ходъ, не должно быть точно опредѣленнымъ, какъ въ синхронномъ моторѣ, и, во-вторыхъ, съ помощью небольшого вспомогательнаго приспособленія его можно пускать въ ходъ и безъ посторонней силы. Это приспособленіе состоитъ во вспомогательныхъ полюсахъ, которые вводятся между переменными полюсами статора; чтобы пустить моторъ въ ходъ, въ катушки вспомогательныхъ полюсовъ пускаютъ переменный токъ, смѣщенный по фазѣ на $\frac{\pi}{2}$. Такимъ образомъ сначала возникаетъ двухфазное вращающееся поле, въ которомъ якорь самостоятельно начинаетъ вращаться. Токъ для вспомогательныхъ полюсовъ отвѣтвляютъ отъ основной цѣпи переменнаго тока, при чемъ необходимая разность фазъ вызывается включеніемъ соотвѣтственныхъ самоиндукцій, конденсаторовъ (см. слѣдующіе параграфы), а иногда также сопротивленій. Когда моторъ начнетъ идти, токъ вспомогательныхъ полюсовъ выключается, послѣ чего моторъ идетъ, какъ однофазный.

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОКЪ И ЕМКОСТЬ.

393. Если мы присоединимъ къ главнымъ зажимамъ машины переменнаго тока зажимы конденсатора емкостью въ нѣсколько микрофарадъ и включимъ въ эту цѣпь подходящую лампу накаливанія, то лампа будетъ ярко горѣть (рис. 301). Если уменьшать емкость, свѣтъ лампы будетъ тускнѣть. Съ источникомъ электричества постояннаго напряженія такой опытъ невозможенъ. Если мы его присоединимъ къ конденсатору, то въ первый моментъ мы получимъ ударъ тока, равный $V \cdot C$ (V —напряженіе источника электричества, C —емкость). Но когда конденсаторъ будетъ заряженъ до напряженія V , электрическое поле придетъ въ равновѣсіе, и не будетъ ни тока, ни магнитнаго поля, ни передачи энергіи; лампа не горитъ совершенно. Наоборотъ, переменное напряженіе за-

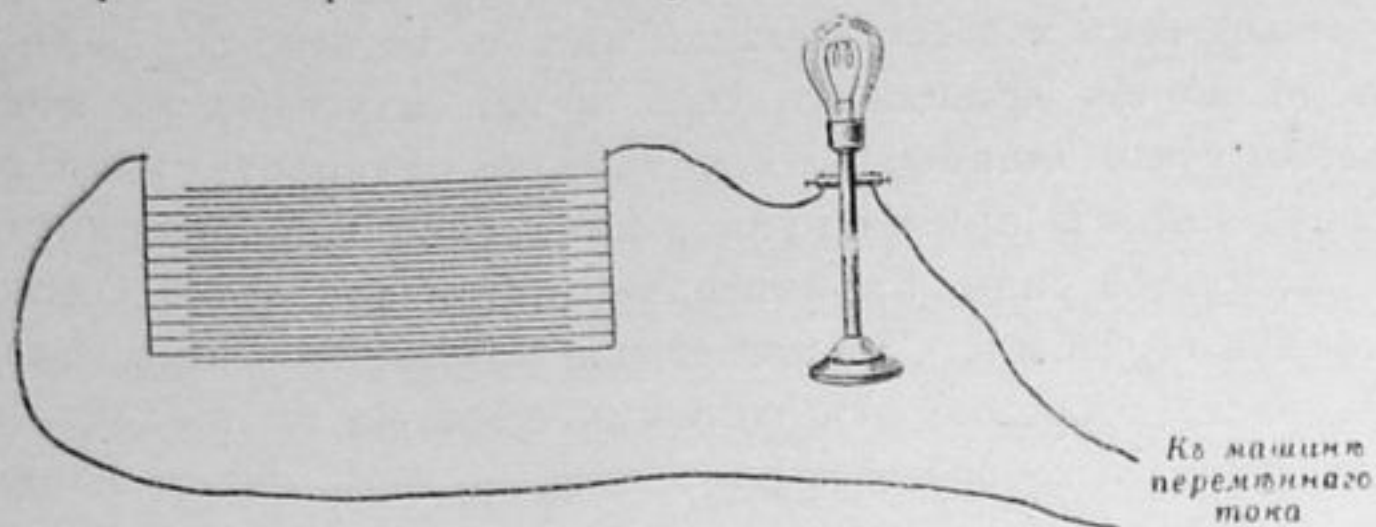


Рис. 301. Емкость въ цѣпи переменнаго тока.

ряжаетъ конденсаторъ попеременно то положительно, то отрицательно, и такимъ образомъ возбуждаетъ въ проводахъ правильный переменный токъ, который можетъ довести лампу до каленія.

Очень легко подыскать механическія аналогіи этому явленію. Какъ и выше, мы возьмемъ въ качествѣ механической модели электрической проводки трансмиссионный валъ. Скорость вращенія вала соотвѣтствуетъ силѣ тока (магнитному полю), его напряженіе при закручиваніи—электрическому напряженію. Если мы соединимъ валъ со спиральной пружиной такъ, чтобы онъ болѣе не могъ непрерывно вращаться, то пружина будетъ соотвѣтствовать включенному въ цѣпь конденсатору; податливость пружины, т.-е. уголъ, на который долженъ повернуться валъ, чтобы въ пружинѣ получилась сила напряженія, равная единицѣ, будетъ соотвѣтствовать емкости.

Если мы будемъ вращать валъ съ силою V , и податливость пружины равна C , то ось совершитъ вращеніе на уголь, равный CV , послѣ чего установится равновѣсіе силъ. Это вращеніе соотвѣтствуетъ удару тока. Если же мы будемъ вращать валъ при помощи періодически измѣняющейся силы, то ось будетъ непрерывно дви-

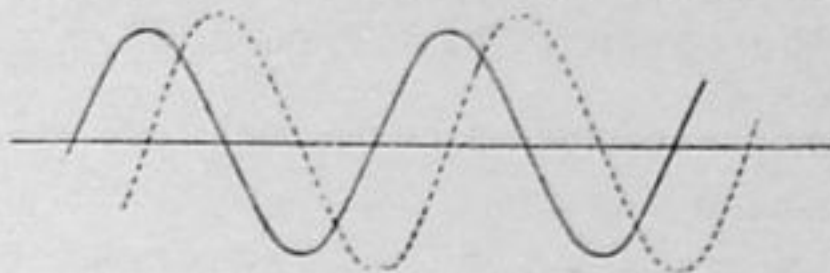


Рис. 302. Оциллограмма напряженія и силы тока въ конденсаторѣ.
 — кривая силы тока, кривая напряженія.

гаться въ ту и другую сторону, — мы имѣемъ здѣсь „перемѣнный токъ“, при чемъ „сила тока“, соотвѣтствующая определенному „перемѣнному напряженію“, пропорціональна податливости пружины и числу перемѣнъ.

394. Если при помощи двойного оциллографа получить одновременно кривыя силы тока и напряженія у зажимовъ конденсатора (рис. 302), то оказывается, что онѣ смѣщены одна относительно другой и разность фазъ между ними равняется $\frac{\pi}{2}$. Согласно § 371, включеніе самоиндукціи даетъ такую же разность фазъ, но въ этомъ случаѣ сила тока развивается послѣ напряженія, тогда какъ въ конденсаторѣ, наоборотъ, сперва образуется токъ (или магнитное поле), а затѣмъ уже вызываемое имъ электрическое поле въ конденсаторѣ.

Передача энергіи совершается такимъ же образомъ, какъ было описано въ § 372 для случая самоиндукціи. Въ первую четверть періода, когда конденсаторъ заряжается, напряженіе повышается отъ нуля до максимума; сила тока въ это время падаетъ отъ максимума до нуля. Энергія въ это время переносится эѳиромъ въ конденсаторъ, сначала медленно, потомъ быстрее и, наконецъ, опять медленно; здѣсь она накапливается въ видѣ электрической энергіи $\left(\frac{1}{2} CV^2\right)$. Во вторую четверть сила тока имѣетъ обратный знакъ и измѣняется отъ нуля до отрицательнаго максимума, знакъ же напряженія остается прежнимъ, и оно падаетъ отъ положительнаго максимума до нуля. Конденсаторъ въ это время разряжается и отдаетъ энергію,

скопившуюся в нем за первую четверть периода, сначала медленно, затем быстрее и в заключение снова медленно. Такой же процесс повторяется и в объѣ послѣднія четверти периода, только напряженіе в это время имѣетъ обратный знакъ. Такимъ образомъ, переносимая энергія в общей сложности равняется нулю, что можно было предвидѣть по разности фазъ, равной $\frac{\pi}{2}$.

395. Эффективная величина силы тока J_{eff} в цѣпи переменнаго тока, содержащей емкость, должна быть пропорціональна слѣдующимъ тремъ величинамъ: 1) эффективному напряженію V_{eff} между зажимами конденсатора; 2) емкости C конденсатора; 3) числу периодовъ n переменнаго напряженія. Какъ показываетъ болѣе точное вычисленіе, сюда нужно еще присоединить численный множитель 2π , т.-е.

$$J_{eff} = 2\pi \cdot n \cdot C \cdot V_{eff}.$$

Кажущееся сопротивленіе конденсатора переменному току равняется

$$R_c = \frac{1}{2\pi n C}.$$

Если между главными зажимами генератора и конденсаторомъ нѣтъ сопротивленія, то V_{eff} есть эффективное напряженіе самага генератора. Если же между генераторомъ и конденсаторомъ включить сопротивленіе R , то напряженіе понизится, и помощью часовой діаграммы легко опредѣлить, насколько именно. Сила тока в проволокаѣ, образующей сопротивленіе, столь же велика, какъ и сила тока смѣщенія в конденсаторѣ; мы обозначимъ ее черезъ J ; пусть на диаграммѣ рис. 303 она изображается стрѣлкой OA . Напряженіе V_1 между зажимами конденсатора имѣетъ величину $\frac{J}{2\pi n C}$ и отстаетъ отъ J на четверть периода; на диаграммѣ оно представляется стрѣлкой OB . Напряженіе между зажимами сопротивленія $V_2 = R \cdot J$ имѣетъ всегда одинаковую фазу съ J ; оно представлено стрѣлкой OC . Если можно пренебречь самоиндукціей, т.-е. если можно принять, что напряженія электродинамическаго поля, которымъ вызывается образованіе магнитнаго поля тока, безконечно малы в сравненіи съ V_1 и V_2 (и если пренебречь безконечно малыми отклоненіями), то в электрическомъ полѣ цѣпи должно господствовать

статическое равновесие, т.-е. линейная сумма поля вдоль всей проводки $V_1 + V_2$ должна быть равна напряжению V между зажимами генератора. Вектор OD , представляющий на диаграмме рис. 303 напряжение V у зажимов генератора, должен быть поэтому равен геометрической сумме векторов OB и OC . Отсюда вытекает соотношение между J_{eff} и V_{eff} :

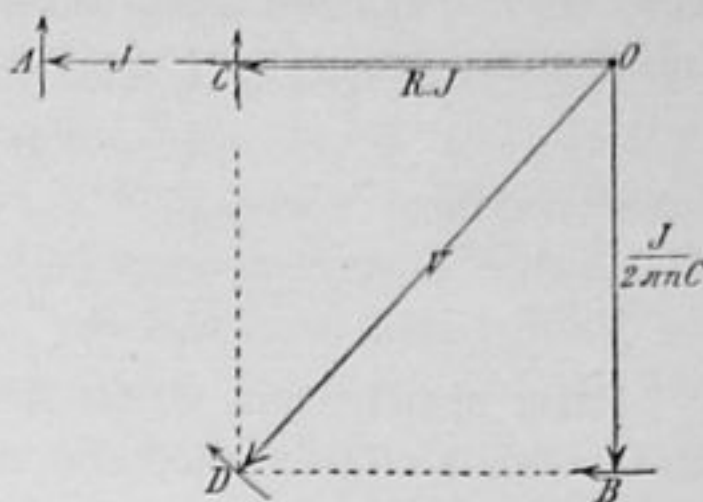


Рис. 303. Часовая диаграмма цепи переменного тока с сопротивлением и емкостью.

$$V_{eff} = J_{eff} \cdot \sqrt{R^2 + \frac{1}{4\pi^2 n^2 C^2}}.$$

Кажущееся сопротивление переменному току цепи, имеющей омическое сопротивление R омов и емкость C фарадъ, равняется

$$R_s = \sqrt{R^2 + \frac{1}{4\pi^2 n^2 C^2}}.$$

Разность фаз ϕ между напряжением у главных зажимов генератора и силой тока J вычисляется, как видно из рис. 303, по формуле

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{1}{2\pi n C \cdot R}.$$

Энергия \bar{U} , выходящая между главными зажимами из машины, равняется энергии, поглощаемой сопротивлением R , так как конденсаторъ ничего не поглощаетъ.

Слѣдовательно, $\bar{U} = V_{eff} \cdot J_{eff} \cdot \cos \phi$ (ср. § 372).

Если переменное напряжение V_{eff} между зажимами имеет разность фаз ϕ относительно силы тока, то энергия, переносимая эфиромъ между зажимами, равняется произведению изъ эффективныхъ величинъ напряжения и силы тока на косинусъ разности фазъ: $\bar{U} = V_{eff} \cdot J_{eff} \cdot \cos \phi$.

СРАВНЕНИЕ ЕМКОСТЕЙ.

396. Если соединить послѣдовательно двѣ емкости C_1 и C_2 и къ конечнымъ зажимамъ A и B приложить переменное напряжение V , то напряжения конденсаторовъ V_1 и V_2 всегда будутъ совпадать по

фазъ между собою и съ V ; кромѣ того, $V_1 + V_2 = V$. Далѣе, такъ какъ токъ смѣщенія J въ обоихъ конденсаторахъ долженъ быть одинаковымъ, то

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2.$$

Слѣдовательно,

$$V_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} V; \quad V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V.$$

Если, кромѣ того, точки A и B соединить измѣрительной проволокой, какъ въ мостикѣ Витстона (§ 262), то напряжения V_1' и V_2' между какой либо точкой P этой проволоки и точками развѣтвленія A и B будутъ всегда совпадать по фазѣ съ V ; кромѣ того, $V_1' + V_2' = V$. Если сопротивленія отрѣзковъ AP и BP равны R_1 и R_2 , то

$$V_1' = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V; \quad V_2' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V.$$

Если точку P выбрать такимъ образомъ, чтобы

$$R_1 : R_2 = C_2 : C_1 = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2},$$

то все время будутъ имѣть мѣсто уравненія $V_1' = V_1$, $V_2' = V_2$.

Поэтому двѣ емкости C_1 и C_2 можно съ большимъ удобствомъ и очень точно сравнивать между собою при помощи телефоннаго моста, подобно электролитическимъ сопротивленіямъ (§ 269) или самоиндукціямъ (§ 374). Такъ какъ правильность колебаній не играетъ при этомъ никакой роли, то переменный токъ можно возбуждать небольшимъ индукціоннымъ аппаратомъ. Если въ воспользоваться калиброваннымъ нормальнымъ микрофарадомъ, то можно любую емкость измѣрить въ легальныхъ единицахъ.

Методъ моста Витстона является безусловно удобнѣйшимъ и лучшимъ способомъ измѣренія емкостей; большинство діэлектрическихъ постоянныхъ были измѣрены этимъ способомъ. Если въ вѣтви съ емкостью находятся, кромѣ того, сопротивленія или самоиндукціи, замѣтно вліяющія на смѣщеніе фазы переменнаго тока, то въ телефонѣ звукъ не прекращается полностью, но получается минимумъ. Однако, примѣняя компенсирующія сопротивленія самоиндукціи или емкости, какъ описано въ § 374, можно напряжения на обоихъ концахъ моста заставить совпадать по фазѣ и добиться рѣзкаго минимума и даже полного исчезновенія звука.

ЦѢПЬ ПЕРЕМѢННАГО ТОКА, СОДЕРЖАЩАЯ ЕМКОСТЬ И САМОИНДУКЦІЮ.

397. Если два главные зажима машины переменнаго тока соединить съ включенными послѣдовательно емкостью и самоиндукціей, то оказывается, что при неизмѣнномъ напряженіи между зажимами токъ въ цѣпи гораздо сильнѣе, нежели при включеніи только самоиндукціи или только емкости. Это легко продемонстрировать, если включить въ цѣпь лампу накаливанія, а зажимы емкости и зажимы самоиндукціи соединить отдѣльно съ двумя парами наполненныхъ ртутью чашечекъ, которыя можно замыкать на короткую мѣдную дугою. Выбравъ надлежащимъ образомъ самоиндукцію и емкость, можно достигнуть того, что лампа будетъ оставаться темной при короткомъ замыканіи одной изъ паръ чашекъ и будетъ ярко горѣть при послѣдовательномъ прохожденіи тока черезъ самоиндукцію и емкость. Если при помощи вольтметра переменнаго тока измѣрить эффективную величину напряженія между зажимами емкости и между зажимами самоиндукціи, когда онѣ обѣ включены одновременно, то она оказывается значительно выше напряженія между зажимами машины.

Эти на первый взглядъ изумительные факты легко объясняются при помощи часовой діаграммы. Пусть J будетъ сила тока въ цѣпи, V_1 — напряженіе между зажимами лампы накаливанія, V_2 и V_3 — напряженія между зажимами самоиндукціонной катушки и конденсатора. Тогда какъ V_1 всегда совпадаетъ по фазѣ съ J , напряженія V_2 и V_3 , наоборотъ, смѣщены соответственно на $+\frac{\pi}{2}$ и $-\frac{\pi}{2}$ (рис. 304). Напряженіе вдоль всей цѣпи, т. е. сумма $V_1 + V_2 + V_3$ равняется напряженію V между главными зажимами генератора. Если составить эту сумму, то оказывается, что V_2 и V_3 отчасти взаимно уничтожаются. Если же выбрать самоиндукцію и емкость такимъ образомъ, чтобы количество $2\pi nL$ незначительно отличалось отъ $\frac{1}{2\pi nC}$ и чтобы R было мало по сравненію съ этими величинами, то напряженія V_2 и V_3 , каждое въ отдѣльности, будутъ велики въ сравненіи съ V . Если мы самоиндукцію или емкость замкнемъ на короткую, то въ діаграммѣ отпадетъ V_2 или V_3 , и для напряженія V должна получиться при томъ же токѣ гораздо большая величина. Но такъ какъ количество V , какъ напряженіе у зажимовъ машины, постоянно, то сила тока должна замѣтно понизиться, пока резуль-

тирующее изъ напряженій V_1 и V_2 или напряженій V_1 и V_3 не станетъ снова равнымъ данной величинѣ V .

Легко построить механическую модель описываемыхъ явленій. Представимъ себѣ, что на ось съ рукояткой насажено маховое колесо, и что ось неподвижно соединена со спиральной пружиной. Если вращать рукоятку попеременно въ ту и другую сторону, прилагая одинаковую силу при вращеніяхъ въ обѣ стороны, то максимальная скорость будетъ получаться всякій разъ при прохожденіи колеса черезъ положеніе равновѣсія, когда сила напряженія пружины равняется нулю. Когда маховое колесо перейдетъ черезъ положеніе равновѣсія, движеніе колеса будетъ постепенно замедляться; такъ же какъ въ то же время натяженіе пружины все болѣе и болѣе противодействуетъ движенію, то приложенной на рукоятку силѣ приходится уравнивать лишь разность между сопротивленіемъ инерціи махового колеса и натяженіемъ пружины. Послѣ того какъ маховое колесо, наконецъ, остановится, оно начинаетъ двигаться въ

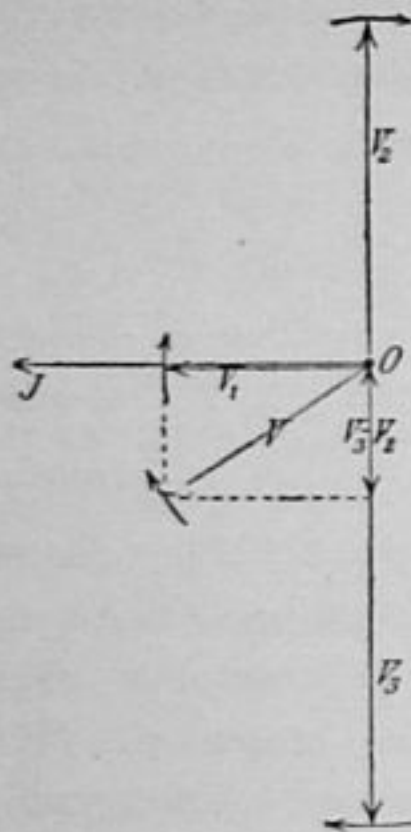


Рис. 304. Часовая діаграмма для цѣпи переменнаго тока съ емкостью, самоиндукціей и сопротивленіемъ.

обратную сторону съ возрастающею скоростью; при этомъ натяженіе пружины дѣйствуетъ въ сторону движенія, и сила, приложенная къ рукояткѣ, опять должна уравнивать лишь разность между сопротивленіемъ инерціи и натяженіемъ пружины. На какой сторонѣ будетъ перевѣсъ, зависитъ отъ величины махового колеса, крѣпости пружины и числа періодовъ переменнаго движенія. Во всякомъ случаѣ, можно достигнуть того, чтобы приложенная къ рукояткѣ сила была меньше натяженія пружины и меньше сопротивленія инерціи. Тогда движеніе колеса будетъ происходить, главнымъ образомъ, подъ дѣйствіемъ натяженія пружины, и, обратно, пружина будетъ приводиться въ состояніе напряженія, главнымъ образомъ, движеніемъ колеса. Энергія колебанія будетъ

скопятся попеременно то въ пружинѣ, въ формѣ энергіи напряженія, то въ маховомъ колесѣ, въ формѣ энергіи движенія; энергія же, переходящая въ ту и другую сторону черезъ рукоятку, весьма мала.

Съ описанной моделью совершенно аналогичны явленія въ разсматриваемой цѣпи переменнаго тока. Напряжение конденсатора возбуждаетъ, главнымъ образомъ, магнитное поле самоиндукціонной катушки, а магнитное поле при исчезновеніи обратно отдаетъ бѣльшую часть напряженія, необходимую для заряженія конденсатора; источникъ переменнаго тока лишь выравниваетъ разности. Энергія переходитъ изъ конденсатора въ самоиндукціонную катушку и обратно; энергія же, выходящая изъ генератора и доставляемая ему, при правильно выбранныхъ отношеніяхъ мала.

398. То обстоятельство, что въ цѣпи переменнаго тока, содержащей емкость и самоиндукцію, могутъ возникать напряженія, значительно бѣльшія, нежели возбуждаемая между главными зажимами генератора, не лишено значенія для техники переменныхъ токовъ. Длинный кабель вмѣстѣ съ діэлектрикомъ между обоими проводами представляетъ емкость и, кромѣ того, онъ имѣетъ довольно бѣльшую самоиндукцію. Поэтому въ длинномъ кабелѣ на большомъ разстояніи отъ генератора переменнаго тока могутъ возникать при благоприятныхъ условіяхъ высокія „перенапряженія“, и можетъ произойти поврежденіе изоляціи. Въ виду этого при проводкахъ переменнаго тока на бѣльшія разстоянія необходимо специальными мѣрами предотвратить или обезвредить подобныя перенапряженія.

РЕЗОНАНСЪ.

399. Если емкость и самоиндукція выбраны такимъ образомъ, что на діаграммѣ векторы V_2 и V_3 равны между собою, то генераторъ переменнаго тока вообще уже не играетъ роли въ движеніи энергіи въ ту и въ другую сторону. Онъ только доставляетъ ту энергію, которая поглощается сопротивленіемъ цѣпи. Возбужденіе магнитнаго поля самоиндукціи совершается всецѣло за счетъ напряженія конденсатора; и обратно, конденсаторъ вновь заряжается исключительно дѣйствіями самоиндукціи. Энергія колеблется между конденсаторомъ и самоиндукціонной катушкой въ ту и другую сторону. Въ этомъ случаѣ говорятъ, что цѣпь переменнаго тока находится въ резонансѣ съ электромагнитными колебаніями генератора. Условіе возникновенія резонанса вытекаетъ изъ равенства $V_2 = V_3$; оно гласитъ:

$$2\pi nL = \frac{1}{2\pi nC},$$

или

$$4\pi^2 \cdot n^2 = \frac{1}{L \cdot C}.$$

Изъ принципа сохраненія энергіи слѣдуетъ, что въ случаѣ резонанса энергія, отнимаемая конденсаторомъ въ максимумѣ, равняется энергіи, которая находится въ магнитномъ полѣ самоиндукціонной катушки на четверть періода до и послѣ того.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЯ КОЛЕБАНИЯ ПРИ РАЗРЯДѢ КОНДЕНСАТОРА

400. Когда заряженный до высокаго напряженія конденсаторъ внезапно разряжаютъ черезъ проволоку, обладающую опредѣленной самоиндукціей, но лишь весьма малымъ сопротивленіемъ, то электрическое напряженіе конденсатора возбуждаетъ магнитное поле тока разряда и доводитъ его, наконецъ, до нѣкотораго максимальнаго значенія, когда вся энергія электрическаго поля въ конденсаторѣ превратится въ магнитную энергію поля тока. Но процессъ этимъ еще не кончается. Дѣйствительно, пока существуетъ магнитное поле, оно должно, какъ было указано въ §§ 250 и 251, сопровождаться перемѣщеніями электрическихъ зарядовъ, а именно электрическимъ токомъ въ проводѣ; этотъ токъ, отнявшій сперва зарядъ отъ конденсатора, за время существованія магнитнаго поля даетъ конденсатору противоположный зарядъ. Вслѣдствіе этого возникаютъ, однако, электрическія напряженія, противоположныя тѣмъ, которыя возбуждали магнитное поле, и благодаря имъ поле затѣмъ уничтожается. Вся энергія магнитнаго поля вновь вступаетъ въ діэлектрикъ конденсатора въ видѣ электрической энергіи. Если же магнитное поле или токъ становятся равными нулю, то напряженіе между пластинами конденсатора вызываетъ въ цѣпи обратный токъ, который разряжаетъ конденсаторъ и затѣмъ заряжаетъ его вновь въ первоначальномъ направленіи. Иными словами, возникаютъ правильныя электрическія колебанія, при которыхъ энергія колеблется между электрическимъ полемъ въ конденсаторѣ и магнитнымъ полемъ цѣпи. Эти колебанія отличаются отъ явленій, описанныхъ выше, лишь тѣмъ, что энергія, поглощаемая въ сопротивленіяхъ, не вводится въ цѣпь внѣшнимъ источникомъ тока. Сейчасъ мы не принимали въ расчетъ сопротивленія разрядной цѣпи. Въ дѣйствительности же оно, конечно, не можетъ равняться нулю, и часть напряженія должна идти

на преодоленіе сопротивленія, потому пропадая для магнитнаго поля. Потеря напряженія составляетъ, можетъ быть, ничтожную часть общаго напряженія, но все-же, благодаря ей, магнитное поле не можетъ достигнуть той величины, которую оно имѣло бы въ случаѣ совершеннаго отсутствія сопротивленія. Вслѣдствіе этого и электрическое поле конденсатора при своихъ правильно совершающихся повтореніяхъ постепенно ослабѣваетъ. При каждомъ колебаніи нѣкоторая часть энергіи переходитъ въ теплоту тока, пока весь запасъ энергіи, заключавшійся сначала въ конденсаторѣ, не будетъ постепенно исчерпанъ; тогда колебанія затухаютъ. Если сопротивление мало въ сравненіи съ самоиндукціей, то выведенное въ предыдущемъ параграфѣ условіе, при которомъ напряженіе конденсатора постоянно находится въ равновѣсіи съ напряженіемъ самоиндукціи, почти не измѣняется. Такимъ образомъ, число n періодовъ колебаній, возникающихъ при разрядѣ конденсатора, опредѣляется уравненіемъ

$$4\pi^2 \cdot n^2 = \frac{1}{L \cdot C}.$$

Если мы обозначимъ черезъ T продолжительность одного полнаго колебанія, то будемъ имѣть: $n \cdot T = 1$ секундѣ, $T = \frac{1}{n}$ секунды. Изъ вышеприведенной формулы слѣдуетъ, что

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}.$$

Такъ какъ емкость C , измѣренная въ фарадахъ, равна $\frac{\text{кулонъ}}{\text{вольтъ}}$, а самоиндукція L , измѣренн-я въ генри, равна $\frac{\text{вольтъ-сек.}}{\text{амперъ}}$, то размѣрность произведенія $L \cdot C$ будетъ $\frac{\text{кулонъ} \cdot \text{вольтъ} \cdot \text{секунда}}{\text{амперъ} \cdot \text{вольтъ}} = \text{сек}^2$; слѣдовательно, размѣрность T , дѣйствительно, есть секунда.

Описанныя сейчасъ электрическія колебанія цѣпи, содержащей емкость и самоиндукцію, называются собственными колебаніями цѣпи, въ отличіе отъ вынужденныхъ колебаній, вызываемыхъ постороннимъ генераторомъ переменнаго тока и имѣющихъ произвольную частоту.

Продолжительность колебанія собственныхъ колебаній цѣпи, содержащей емкость и самоиндукцію, равняется $T = 2\pi \cdot \sqrt{C \cdot L}$ секундамъ, если емкость C измѣрена въ фарадахъ, а самоиндукція L —въ генри.

Формула для продолжительности колебанія была дана сэромъ В. Томсономъ (лордомъ Кельвиномъ), почему она и называется

формулой Томсона. Слѣдующее предложеніе является теперь очевиднымъ.

Цѣпь, заключающая емкость и самоиндукцію, находится въ резонансѣ съ генераторомъ переменнаго тока, если число періодовъ ея собственныхъ колебаній совпадаетъ съ числомъ періодовъ генератора переменнаго тока.

Легко найти соотвѣтствующую механическую аналогію. Представимъ себѣ ось съ маховымъ колесомъ, неподвижно соединенную со спиральной пружиной, напримѣръ, съ балансиромъ карманныхъ часовъ. Если мы повернемъ колесо такъ, чтобы пружина пришла въ состояніе напряженія, и затѣмъ внезапно его отпустимъ, то возникнутъ правильныя колебанія. Упругія силы пружины приводятъ колесо въ движеніе, и его скорость достигнетъ наибольшей величины, когда пружина придетъ въ нормальное состояніе. Вслѣдствіе движенія колеса, пружина начнетъ затѣмъ закручиваться въ противоположную сторону и при этомъ будетъ противодѣйствовать движенію колеса, пока, наконецъ, не приведетъ его въ состояніе покоя. Послѣ этого пружина начинаетъ двигать колесо въ противоположномъ направленіи, закручивается имъ вновь въ ту же сторону, что и первоначально, и весь процессъ повторяется снова. Энергія колеблется между пружиной, гдѣ она является въ видѣ энергіи напряженія, и колесомъ, которое получаетъ ее въ видѣ энергіи движенія. Такъ какъ упругія силы пружины должны преодолѣвать, кромѣ инерціи колеса, еще сопротивленія тренія, то колебанія будутъ затухающими, при чемъ все время часть энергіи будетъ переходить въ теплоту тренія. Самоиндукціи L здѣсь соотвѣтствуетъ моментъ инерціи колеса, который мы обозначимъ черезъ K ; емкости C соотвѣтствуетъ податливость пружины F по отношенію къ вращеніямъ колеса, т.-е. отношеніе угла, на который поворачивается колесо изъ своего положенія равновѣсія, къ моменту вращенія, съ которымъ натянутая пружина стремится повернуть колесо въ обратную сторону. Величину, обратную податливости, т.-е. отношеніе момента вращенія къ углу вращенія, называютъ направляющей силой пружины; если мы обозначимъ ее черезъ D , то $D = \frac{1}{F}$. Періодъ колебанія балансира опредѣляется извѣстной формулой маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{D}}.$$

Если вмѣсто D ввести сюда $F = \frac{1}{D}$, то получимъ

$$T = 2\pi\sqrt{K.F.}$$

Очевидна аналогія между этой формулой и формулой Томсона, которая поэтому и представляет собою не что иное, какъ формулу маятника для электромагнитныхъ колебаній.

Если колеблющійся часовой балансиръ мы предоставимъ самому себѣ, то черезъ нѣкоторое время онъ остановится вслѣдствіе затуханія колебаній. Поддерживать его въ движеніи въ теченіе продолжительнаго времени можно лишь путемъ вынужденныхъ колебаній. Если число періодовъ вынужденныхъ колебаній равняется числу періодовъ собственныхъ колебаній, то, примѣняя переменную вращающую силу опредѣленной величины, мы получимъ относительно наибольшія отклоненія. Въ этомъ случаѣ имѣетъ мѣсто резонансъ.

401 Если для наблюденія электрическихъ колебаній разрядить большую емкость черезъ довольно большую самоиндукціонную катушку, то накопленная энергія уже при малыхъ напряженіяхъ достаточно велика, чтобы дать сильныя колебанія. При малыхъ напряженіяхъ замыканіе тока въ разрядной цѣпи можно производить обыкновеннымъ замыкателемъ. Такія колебанія, конечно, являются относительно медленными; напримѣръ, при $C = 1M \text{ Ф}$ и $L = 1Г$, $T = 0,0063$, т.-е. число колебаній въ секунду равняется 156.

Если желаютъ получить большія числа колебаній, возбуждая послѣднія при помощи малыхъ емкостей и малыхъ самоиндукцій, напримѣръ, при помощи лейденской банки и короткаго замыкателя между ея обкладками, то емкость заряжаютъ до высокаго напряженія для того, чтобы энергія колебанія не была слишкомъ мала, и въ качествѣ замыкателя тока пользуются искрой разряда. Такимъ образомъ, опытъ сводится просто къ тому, что обѣ обкладки лейденской банки соединяются короткими толстыми проволоками съ небольшимъ искровымъ перерывомъ, къ электродамъ котораго присоединяются провода отъ индукціоннаго аппарата или электростатической индуктивной машины (рис. 305). Всякій разъ какъ достигается разрядное напряженіе, проскакиваетъ искра, принимающая,

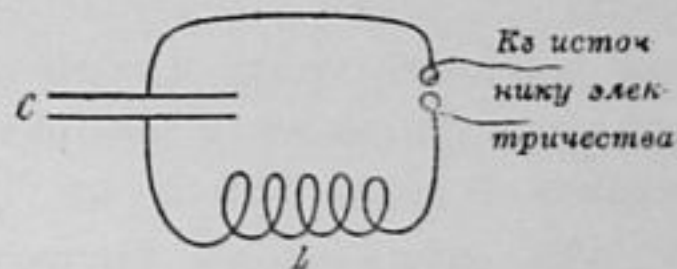


Рис. 305. Схема включенія искрового осциллятора.

какъ мы знаемъ (§ 194), весьма скоро форму хорошо проводящей дуговой искры. Пока возникающій при этомъ переменный токъ большой частоты имѣетъ большую силу, искра проводитъ хорошо. Но когда сила тока вслѣдствіе затуханія слишкомъ понизится, искра слабѣетъ и колебанія довольно быстро прекращаются.

Емкость лейденской банки вообще близка къ $\frac{1}{1000}$ микрофарада, самоиндукція проволочной дуги длиною около метра близка къ $\frac{1}{1000000}$ генри. При $C = 10^{-9}$, $L = 10^{-6}$ формула Томсона даетъ $T = 2 \cdot 10^{-7}$, т.-е. частота колебаній составляетъ круглымъ счетомъ 5 милліоновъ въ секунду. Обычно при разрядахъ лейденскихъ банокъ или батарей такихъ банокъ черезъ длинныя и короткія проволоки частота колебаній составляетъ милліоны или сотни тысячъ въ секунду.

Что разрядъ конденсатора имѣетъ колебательный характеръ, впервые было доказано теоретически сэромъ В. Томсономъ, а позже (1862) это было экспериментально установлено Феддерсеномъ (Feddersen). Дуговая искра, подобно непрерывной свѣтовой дугѣ, отличается тѣмъ большей яркостью, чѣмъ больше сила тока. Поэтому, если черезъ искровой промежутокъ проходитъ переменный токъ высокой частоты, то искра имѣетъ попеременно то яркій, то слабый свѣтъ. Феддерсенъ при помощи весьма быстро вращающагося вогнутого зеркала направлялъ изображеніе разрядной искры на фотографическую пластинку и такимъ образомъ получалъ рядомъ одно за другимъ фотографическія изображенія послѣдовательныхъ стадій развитія искры. Когда скорость вращенія была достаточно велика, то получался рядъ свѣтлыхъ изображеній искры, раздѣленныхъ темными промежутками. Такъ какъ скорость вращенія зеркала и разстоянія зеркала отъ искры и отъ пластинки были извѣстны, то путемъ измѣренія разстояній между изображеніями искры можно было опредѣлить продолжительность электрическаго колебанія. Результатъ подтвердилъ формулу Томсона.

402. Возникновеніе быстрыхъ электрическихъ колебаній при разрядахъ имѣетъ особенно важное значеніе потому, что при помощи машинъ переменнаго тока можно достигнуть лишь сравнительно небольшого числа періодовъ. Тесла (Tesla) однажды при помощи специально построенной машины достигъ числа періодовъ,

равнаго 30000 въ секунду. Для всѣхъ бѣльшихъ чиселъ періодовъ приходится пользоваться собственными колебаніями конденсаторныхъ цѣпей. Здѣсь мы имѣемъ то же самое, что и въ механикѣ. Аппараты, совершающіе колебанія въ ту и другую сторону съ небольшимъ числомъ періодовъ, можно приводить въ движеніе при помощи мотора. Чтобы получить бѣльшія частоты, разсматриваемая въ той части механики, которая называется акустикой, пользуются собственными колебаніями механическихъ осцилляторовъ — струнъ, воздушныхъ столбовъ, колоколовъ и т. д.

Чтобы по возможности уменьшить затуханіе колебаній конденсатора, слѣдуетъ сдѣлать возможно меньшимъ сопротивленіе цѣпи. Главное сопротивленіе всегда заключается въ искрѣ и обычно составляетъ нѣсколько омовъ. Прежде всего, слѣдовательно, нужно сдѣлать искру весьма сильной, а для этой цѣли необходимъ разрядный токъ большой силы. Поэтому емкость конденсатора должна быть не слишкомъ малой и искровой промежутокъ не слишкомъ короткимъ, такъ какъ сила разряднаго тока падаетъ пропорціонально разрядному напряженію. Съ другой стороны, искра не должна быть также и слишкомъ длинной, такъ какъ сопротивленіе искры сильно возрастаетъ съ длиною. Для каждой емкости существуетъ наивыгоднѣйшая длина искры, при которой колебанія наименѣе затухаютъ; ее слѣдуетъ опредѣлять эмпирически. Когда искра даетъ хорошія колебанія, ея трескъ отличается особенной рѣзкостью. Поэтому слѣдуетъ заботиться о томъ, чтобы, кромѣ искры, въ цѣпи не было никакихъ сопротивленій, которыя могли бы оказывать вліяніе. Дѣйствительно, сила разряднаго тока уменьшается этими сопротивленіями, вслѣдствіе чего искра тотчасъ же ослабляется и затуханіе возрастаетъ чрезвычайно сильно. Во многихъ случаяхъ оказывается практичнымъ пускать искру не въ воздухъ, но въ изолирующую жидкости, лучше всего въ керосинѣ. При этомъ уже при короткихъ искровыхъ промежуткахъ получаютъ очень высокія разрядныя напряженія, т.-е. бѣльшія силы тока, и сопротивленіе искры становится поэтому очень малымъ.

ВОЗНИКНОВЕНІЕ КОЛЕБАНИЙ ВСЛѢДСТВІЕ РЕЗОНАНСА.

403. Если замкнутую разрядную цѣпь конденсатора внести въ переменное электромагнитное поле, то въ ней возникаетъ индуктированный переменный токъ. Онъ имѣетъ весьма значительную ампли-

туду, если цепь конденсатора находится въ резонансѣ съ переменнымъ полемъ. Дѣло въ томъ, что каждый электрическій ударъ напряженія вызываетъ въ цепи собственныя колебанія. Если переменныя возбуждающаго поля совершаются въ томъ же темпѣ, какъ и собственныя колебанія, то каждое слѣдующее колебаніе будетъ усиливаться полемъ, и амплитуда будетъ все возрастать, пока, наконецъ, возрастающія одновременно потери энергіи вследствие омическаго сопротивленія и т. д. не станутъ равны количеству энергіи, доставляемому переменнымъ полемъ; тогда дальнѣйшее возрастаніе амплитуды прекратится. Такимъ образомъ, послѣ ряда колебаній амплитуда достигаетъ максимума; затѣмъ, когда первичныя колебанія затухаютъ, она постепенно падаетъ вмѣстѣ съ ними. Если же собственныя колебанія цепи имѣютъ иной періодъ, то они не поддерживаются долго переменнымъ полемъ и не развиваются до большой амплитуды. Въ этомъ случаѣ мы получаемъ, главнымъ образомъ, вынужденное колебаніе съ числомъ періодовъ переменнаго поля, налагающееся на слабое собственное колебаніе конденсаторной цепи. Вынужденное колебаніе также сравнительно очень слабо, такъ какъ въ теченіе большого числа послѣдовательныхъ періодовъ не происходитъ его усиленія черезъ резонансъ.

Получаемая посредствомъ резонанса сильныя колебанія можно демонстрировать съ помощью весьма простаго опыта, впервые произведеннаго Лоджемъ (Lodge). Около электрическаго осциллятора (искровой промежутокъ котораго нужно представлять себѣ соединеннымъ съ индукторомъ) помѣщаютъ цепь колебаній, поддающуюся настраиванію, а именно лейденскую банку, которая должна быть возможно точнѣе равна банкѣ осциллятора (рис. 306). Съ обкладками этой банки соединяютъ двѣ параллельныя проволоки, которыя между собой соединены третьей, передвижной проволокой. Если этотъ проволочный мостъ передвинуть въ такое положеніе, чтобы замкнутая имъ цепь проводниковъ была равна цепи осциллятора, то въ ней вследствие резонанса возникаютъ очень сильныя колебанія. Эти послѣднія можно наблюдать при помощи небольшого искрового промежутка, включаемаго, какъ показываетъ рис. 306, между внѣшней и внутренней обкладками лейденской банки безъ промежуточныхъ длинныхъ проволокъ. Въ случаѣ резонанса, переменное напряженіе между обкладками повышается настолько, что проскакиваетъ искра. Каждая искра осциллятора сопровождается тогда

искрой въ небольшомъ искровомъ промежуткѣ резонансной цѣпи. Если резонансъ разстроить, для чего достаточно перемѣстить передвижную проволоку изъ ея положенія, дающаго резонансъ, то сопровождающія искры тотчасъ же прекращаются, такъ какъ амплитуда напряженія уже не достигаетъ величины, необходимой для искрового разряда.

Врядъ ли нужно указывать на полную аналогію между этими резонансными явлениями и резонансомъ механическихъ колебаній,

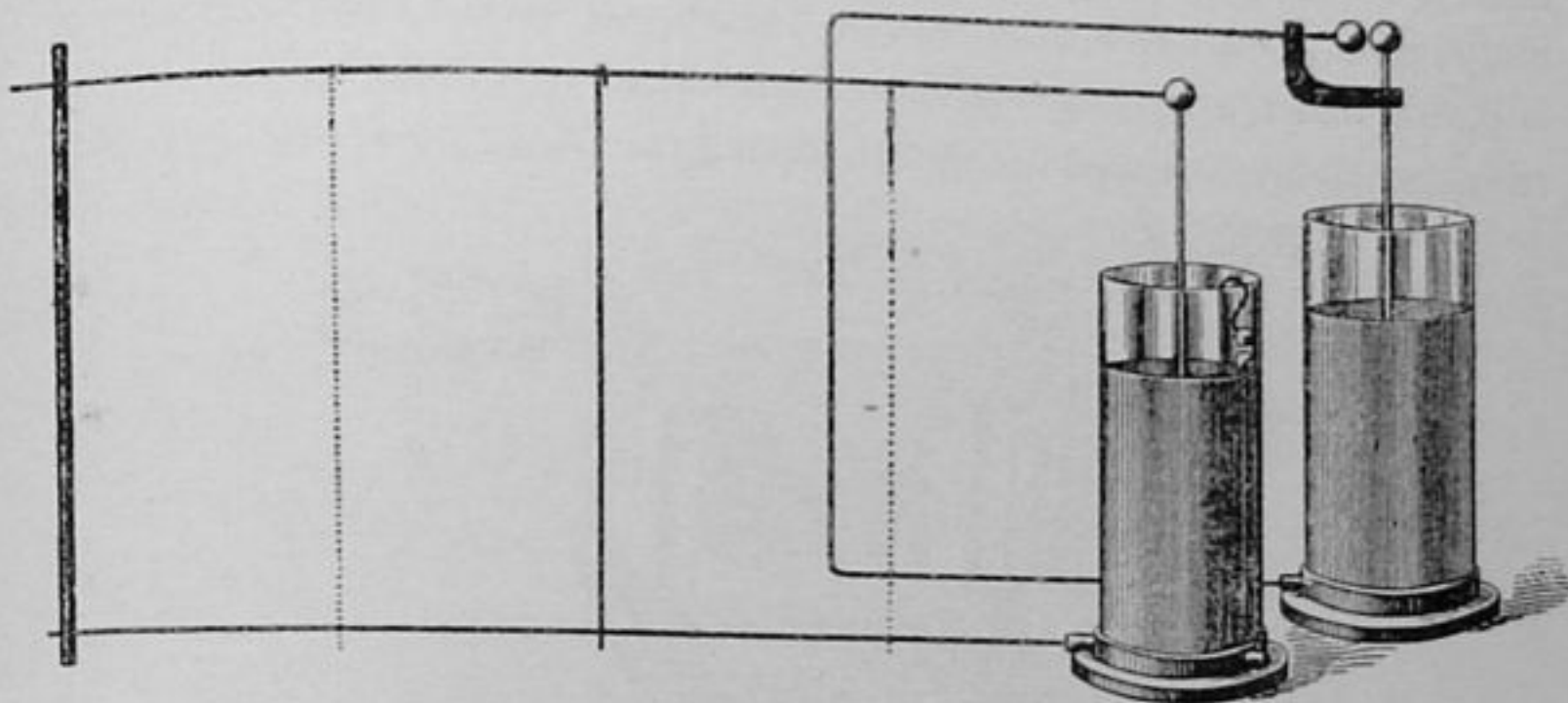


Рис. 306. Опытъ Лоджа, показывающій резонансъ электрическихъ колебаній. Искровой промежутокъ осциллятора долженъ быть соединенъ съ полюсами индуктора.

извѣстнымъ изъ акустики. Если ударить по одному изъ двухъ совершенно одинаково настроенныхъ камертоновъ, то, спустя короткое время, второй камертонъ также начинаетъ совершать колебанія и звучать. Если же первый камертонъ слегка разстроить, на примѣръ, приклеивъ къ его вѣтви шарикъ, то исходящія отъ него воздушныя колебанія уже не будутъ возбуждать второго камертона.

404. На возбужденіи колебаній посредствомъ резонанса основанъ важный методъ экспериментальнаго опредѣленія числа періодовъ электромагнитнаго колебанія. Для этой цѣли употребляютъ измѣритель частоты, принципъ устройства котораго легко понять изъ рис. 307. Важнѣйшей частью этого инструмента является передвижной конденсаторъ; обѣ системы его пластинокъ составлены изъ листовъ въ формѣ полукруговъ. Одна система пластинокъ закрѣплена неподвижно, а другая можетъ вращаться вокругъ оси, такъ что въ промежуточные

пространства неподвижной системы входят большой или меньшей секторъ. Чѣмъ глубже вдвинуть подвижную систему въ неподвижную, тѣмъ больше будетъ емкость. На оси вращения наверху помещенъ указатель, скользящій по круговой шкалѣ. Обѣ системы пластинъ соединены между собою проволочной окружностью, состоящей изъ не очень широкихъ витковъ; числа на круговой шкалѣ вмѣсто емкости даютъ прямо соответствующее ей число періодовъ цѣпи, содержащей конденсаторъ и самоиндукцію. Къ аппарату присоединяютъ нѣсколько проволочныхъ окружностей съ различными самоиндукціями; имъ соответствуютъ нѣсколько чиселъ, нанесенныхъ у каждаго дѣленія круговой шкалы. Такимъ путемъ при помощи одного инструмента можно получить большую область частотъ. Чтобы

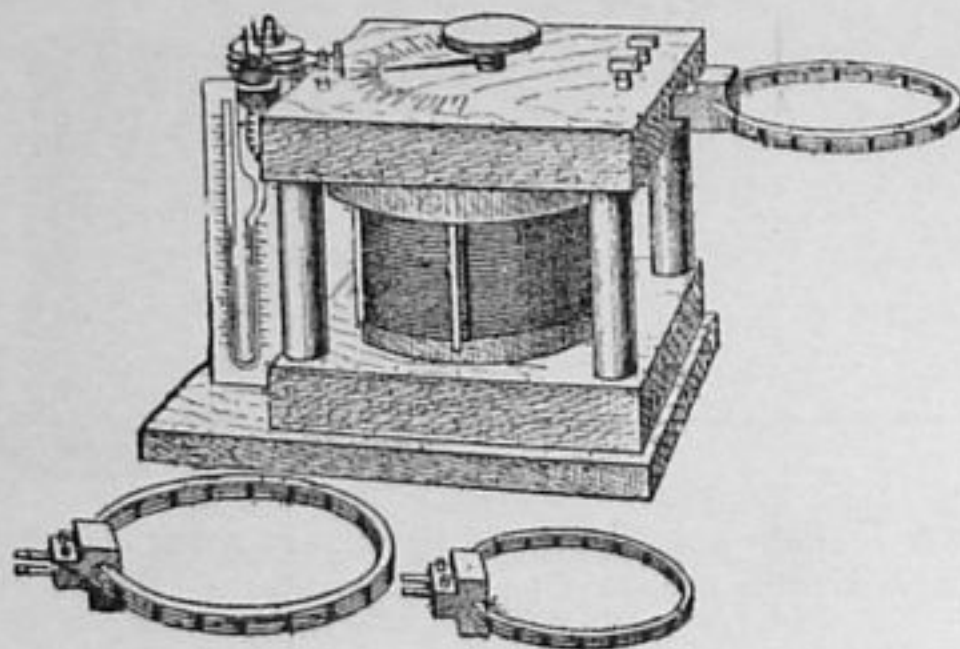


Рис. 307. Измѣритель частоты.

измѣрить число періодовъ электромагнитнаго колебанія, въ переменное поле вводятъ проволочную окружность измѣрителя частотъ такимъ образомъ, чтобы индуктировались возможно болѣе сильныя токи. Послѣ этого устанавливаютъ вращающійся конденсаторъ и наблюдаютъ, какому дѣленію шкалы соответствуютъ наиболѣе интенсивныя индуктированныя колебанія. Интенсивность ихъ опредѣляется при помощи тепловаго инструмента, связаннаго индуктивно при помощи изолированной катушки съ другой небольшою катушкой, включенной въ цѣпь измѣрителя частотъ. Этотъ тепловой инструментъ виденъ на рис. 307 съ лѣвой стороны; нагрѣвающаяся проволока пропущена черезъ сосудъ небольшого воздушнаго термометра, и перемѣщеніе жидкаго столба, сжимаемаго воздухомъ, служитъ мѣрою нагрѣванія проволоки. Вращающійся конденсаторъ

устанавливается таким образом, чтобы при прочих равных условиях воздушный термометр давал максимальную температуру нагревания. Число колебаний, указываемое при этом стрелкой, и является искомым, так как измеритель частоты на него резонирует.

405. Если первичную колебательную цепь приблизить к настроенной одинаково с ней вторичной цепи настолько, чтобы обе цепи (как в трансформаторе) были очень сильно между собою связаны, то наблюдается своеобразное явление. Сильное переменное поле вызывает при этих условиях во вторичной цепи настолько сильные токи, что энергия колебания последней вскоре становится столь же большой, как и у первичного осциллятора. Первичный осциллятор должен, конечно, сообщать энергию вторичной цепи, и энергия, таким образом, переходит из первичной цепи во вторич-

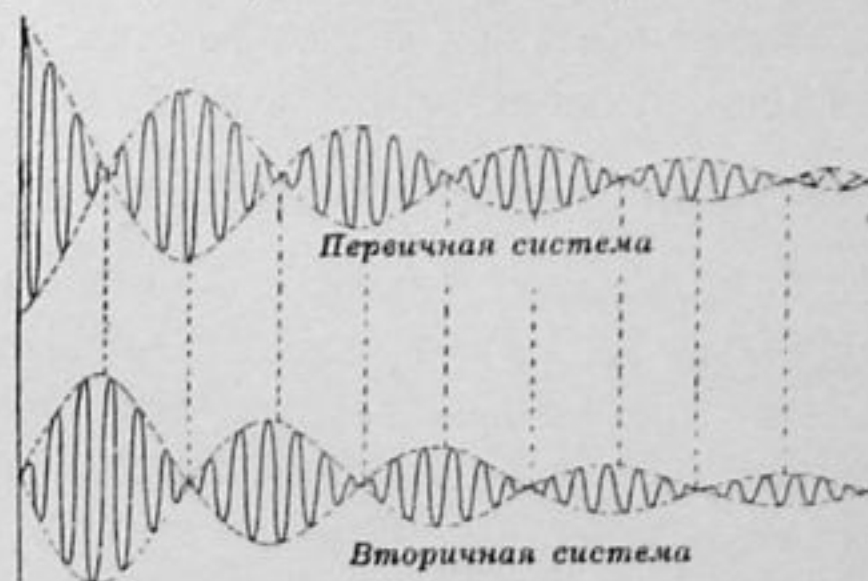


Рис. 308. Биеция вследствие сильной связи двух резонирующих цепей.

ную. Если связь очень сильна, то первичная цепь в конце концов отдает всю энергию еще прежде, чем значительная ее часть истратится в силу неизбежных потерь; тогда во вторичной цепи будут господствовать сильные колебания, а в первичной цепи они совершенно затухают. В этот момент осцилляторы меняются ролями; второй осциллятор отдает энергию первому до тех пор, пока из него не выйдет вся энергия, и колебания сохранятся лишь в первом. Затем весь процесс начинается снова. Если при помощи приспособленного для этой цели осциллографа снять кривые колебаний, то получаются кривые, изображенные на рис. 308.

При сильной связи двух одинаково настроенных осцилляторов в них возникают биеция: энергия колебания попеременно переходит от одного осциллятора к другому.

Это явленіе давно уже извѣстно изъ механики. Его можно наблюдать, на примѣръ, если два маятника, имѣющіе совершенно одинаковые періоды колебаній, подвѣсить рядомъ на упругомъ горизонтальномъ стержнѣ, такъ что, благодаря колебанію стержня, энергія можетъ передаваться отъ одного маятника къ другому. Біенія можно получить также путемъ сложенія двухъ колебаній, числа періодовъ которыхъ немного различаются между собой. Поэтому найденный нами выше результатъ можно выразить еще такъ: при прочной связи двухъ одинаково настроенныхъ осцилляторовъ возникаютъ два налагающіяся одно на другое колебанія, числа періодовъ которыхъ нѣсколько различаются между собой. Одно колебаніе нѣсколько медленнѣе, а другое — быстрѣе по сравненію съ числомъ періодовъ собственнаго колебанія обоихъ осцилляторовъ, когда они колеблются отдѣльно. Вмѣстѣ они даютъ біенія.

ОПЫТЫ СЪ ЧАСТЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ.

406. Много поучительныхъ опытовъ съ колебаніями, число періодовъ которыхъ близко къ 10^6 , описалъ Тесла; иногда ихъ называютъ въ его честь „колебаніями Тесла“, хотя вовсе не онъ ихъ открылъ. Мы опишемъ сейчасъ нѣкоторые опыты Тесла.

Въ противоположность тому, что имѣетъ мѣсто при стационарныхъ токахъ, омическое сопротивленіе при конденсаторныхъ колебаніяхъ играетъ второстепенную роль. Какъ непосредственно можно предсказать на основаніи теоріи, развитой въ § 400, главной функціей электрическихъ напряженій переменнаго тока высокой частоты является возбужденіе и прекращеніе быстро мѣняющагося магнитнаго поля. Для преодоленія омическаго сопротивленія достаточно чрезвычайно малой доли напряженій, и несравненно большая часть ихъ идетъ на преодоленіе самоиндукціи. Если мы соединимъ обкладки большихъ лейденскихъ банокъ (рис. 309) черезъ искровой промежутокъ и широкую спираль изъ толстой мѣдной проволоки и параллельно искровому промежутку приключимъ мощный индукторъ, разряды котораго вызываютъ сильныя электромагнитныя колебанія, то между отдѣльными витками мѣднаго соленоида возникнутъ столь сильныя напряженія, служащія для возбужденія измененій магнитнаго поля въ соленоидѣ, что при нѣкоторомъ сближеніи двухъ витковъ будутъ проскакивать между ними искры. Полезно

заклучить искровой промежутокъ осциллятора въ деревянный ящикъ, какъ показываетъ рис. 309, чтобы рѣзкій свѣтъ искры не мѣшалъ наблюденіямъ. Если къ двумъ не слишкомъ удаленнымъ другъ отъ друга виткамъ приложить провода, ведущіе къ лампѣ накаливанія, то она ярко вспыхиваетъ. Этотъ опытъ долженъ казаться поразительнымъ для незнакомыхъ съ явленіями электрическихъ колебаній, такъ какъ выходитъ какъ будто, что лампа накаливанія, сопротивление которой составляетъ, можетъ быть, 50 омовъ, замкнута на короткую

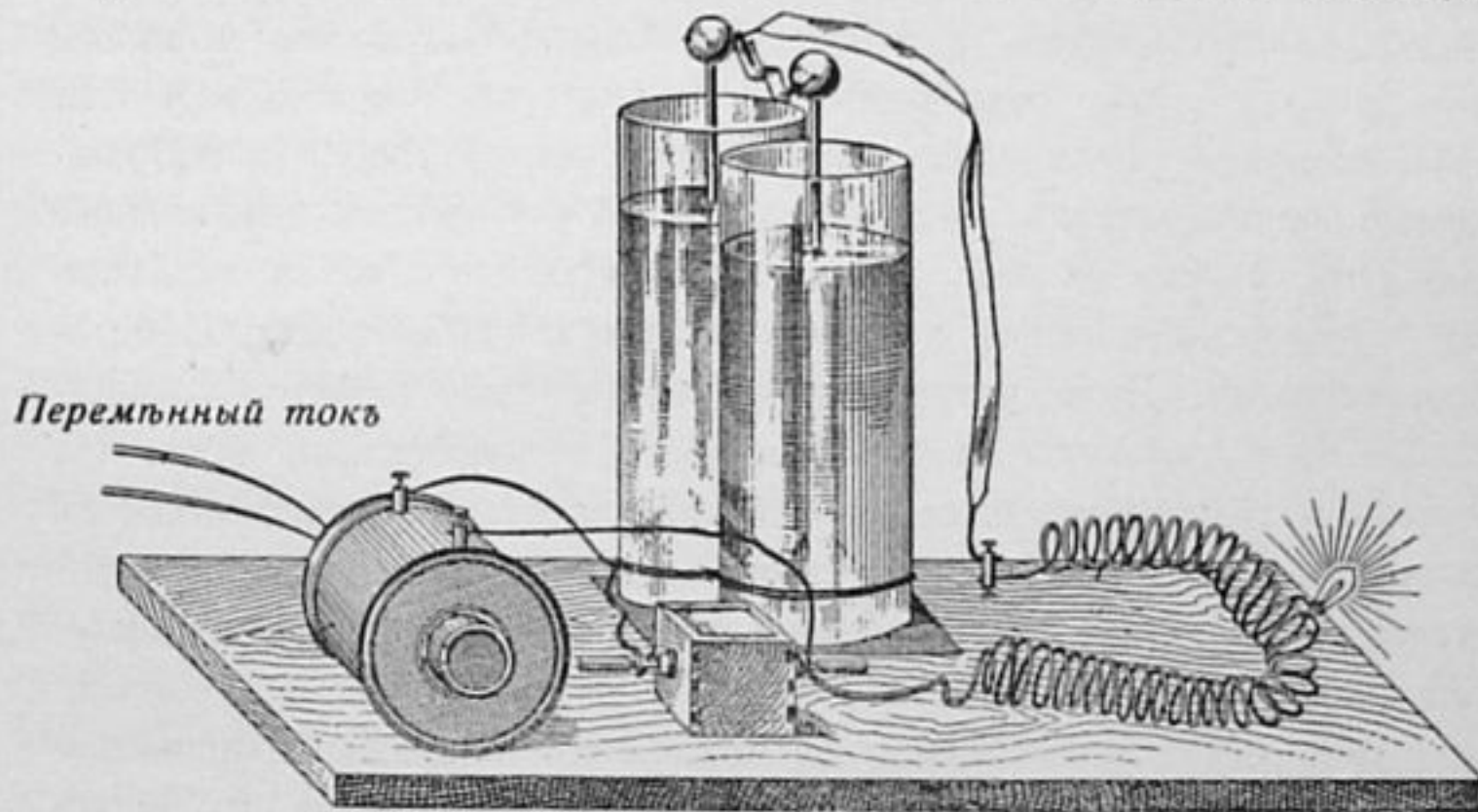


Рис. 309. Демонстрація сильныхъ напряженій самоиндукціи въ электрическомъ осциляторѣ.

мѣдной проволокой, сопротивление которой меньше $\frac{1}{1000}$ ома. Въ дѣйствительности, если бы мы пожелали включенную такимъ образомъ лампу заставить горѣть помощью постояннаго тока, то мѣдная проволока расплавилась бы гораздо раньше, чѣмъ мы могли бы достигнуть нашей цѣли.

407. Съ большими напряженіями въ переменныхъ поляхъ высокой частоты можно хорошо познакомиться на явленіяхъ индукціи. Если въ разрядную цѣпь лейденскихъ банокъ включить катушку, состоящую изъ небольшого числа витковъ съ діаметромъ приблизительно въ 20 сантиметровъ, и приближать къ ней другую такую катушку съ нѣскольکو бѣльшимъ числомъ витковъ, въ которую включена лампа накаливанія, то послѣдняя начинаетъ горѣть уже на довольно большомъ разстояніи отъ первой цѣпи. При надлежа-

шемъ выборѣ катушекъ легко такимъ путемъ заставить горѣть лампу на 100 и больше вольтъ. Лампа меньшаго напряженія горитъ уже въ томъ случаѣ, когда вторичная цѣпь состоитъ только изъ одной мѣдной проволоки, имѣющей форму окружности.

Линіи электрическаго поля, которое должно вызывать измѣненія магнитнаго поля внутри круговой катушки, имѣютъ приблизительно форму окружностей, концентричныхъ съ катушкой. Это своеобразное электрическое поле съ замкнутыми силовыми линіями можно демонстрировать при помощи полаго стекляннаго шара, въ которомъ воздухъ разрѣженъ настолько, что легко образуются тихіе разряды. Если ввести этотъ шаръ въ катушку, то мы увидимъ въ немъ разрядъ, представляющій собою свѣтящееся кольцо. Наиболѣе силенъ разрядъ во внѣшней части; сила свѣта слабѣетъ по мѣрѣ приближенія къ центру шара, гдѣ воздухъ остается темнымъ. Путь разряда показываетъ намъ здѣсь приблизительно ходъ силовыхъ линій переменнаго электрическаго поля. На этомъ опытѣ мы можемъ съ особой наглядностью познакомиться съ сущностью электродинамическихъ полей, а именно съ тѣмъ обстоятельствомъ, что въ нихъ линейная сумма напряженія вдоль замкнутой кривой не равняется нулю.

408. При всякомъ электрическомъ токѣ напряженіе, приводящее въ движеніе электроны или іоны внутри проводника, и уничтожающееся вслѣдствіе передвиженія іоновъ, всегда возстановляется извнѣ. Какъ мы видѣли въ § 239, функція магнитнаго поля тока состоитъ въ безпрестанномъ возбужденіи переноса напряженій извнѣ внутрь проводника. Въ проводникѣ эти напряженія тотчасъ исчезаютъ и съ тѣмъ большей скоростью, чѣмъ больше проводимость. Поэтому, если внѣшнее поле измѣняется очень быстро, какъ, напри- мѣръ, при электрическомъ колебаніи, то электрическое напряженіе въ очень хорошихъ проводникахъ не проникаетъ вовсе вглубь проволоки, такъ какъ напряженіе уничтожается въ ея внѣшнихъ слояхъ, прежде чѣмъ оно вызоветъ достаточно сильное магнитное состояніе для переноса напряженій вглубь. Внѣшніе слои проводника экранируютъ его внутреннія части отъ быстрыхъ электрическихъ колебаній. Только въ томъ случаѣ, если внѣшнее напряженіе поддерживается въ теченіе продолжительнаго времени, поле, несмотря на непрерывный распадъ, постепенно проникаетъ въ про-

водникъ все глубже и глубже. Поэтому при постоянномъ токѣ и медленномъ переменномъ токѣ заполняется все сѣченіе проводника.

Механическимъ образомъ этого явленія служитъ передача движеній черезъ вязкую среду. Если, на примѣръ, ремень движется по ременному шкиву со скольженіемъ при наличности между ними слоя смазочнаго вещества, то отъ ремня черезъ промежуточный слой до шкива проникаютъ лишь болѣе продолжительныя тяги. Если же дернуть ремень, то въ вязкомъ промежуточномъ слоѣ возникаетъ скольженіе: только слой смазки, прилежащій непосредственно къ ремню, будетъ имъ увлекаться, внутренніе же слои вслѣдствіе сопротивленія инерціи колеса будутъ оставаться въ покоѣ. Такимъ образомъ, внутренніе слои смазки „экранируются“ внѣшними отъ быстрыхъ движеній въ ту и другую стороны, но очень медленныя переменныя силы могутъ передаться, и лучше всего передается до шкива равномерно дѣйствующая тяга.

Экранирующее дѣйствіе внѣшнихъ слоевъ проводника по отношенію къ весьма быстрымъ колебаніямъ можно демонстрировать на опытѣ при помощи металлической трубки, по оси которой протянута мѣдная проволока, соединенная съ обѣихъ сторонъ съ трубкой.

Если такую трубку включить въ разрядную цѣпь конденсатора, то весь переменный токъ высокой частоты пройдетъ по трубкѣ, а мѣдная проволока, вообще говоря, не будетъ затронута переменнымъ

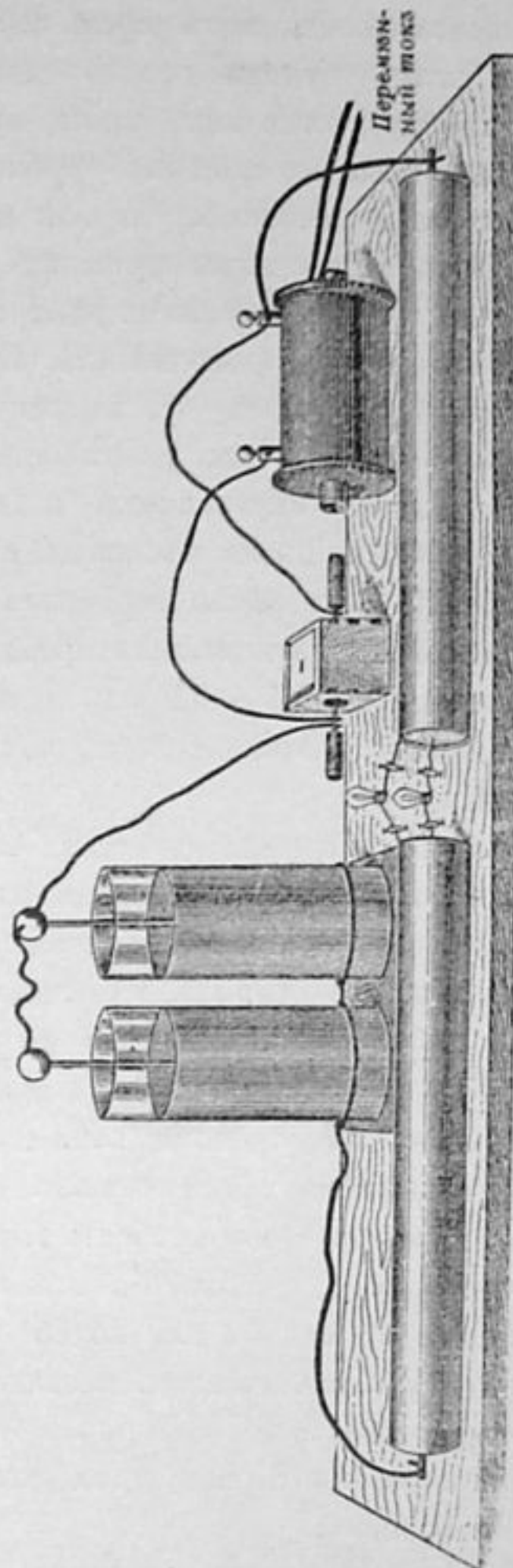


Рис. 310. Внѣшніе слои проводника экранируютъ его внутреннія части отъ быстрыхъ колебаній.

электромагнитнымъ полемъ. Чтобы это показать, трубку и проволоку разрѣзаютъ посрединѣ и обѣ половины какъ трубки, такъ и проволоки соединяютъ черезъ небольшую лампу накаливанія (рис. 310). При этомъ будетъ горѣть лишь лампа накаливанія, включенная въ трубку, тогда какъ лампа, включенная въ проволоку, останется темной. Если къ концамъ трубки приложить постоянное напряжение надлежащей величины, то обѣ лампы горятъ одинаково ярко.

Изъ теоріи экранирующаго дѣйствія непосредственно слѣдуетъ, что оно будетъ выражено тѣмъ сильнѣе, чѣмъ выше число періодовъ и чѣмъ больше проводимость. При обычно примѣняемомъ въ техникѣ числѣ періодовъ—50 въ секунду—даже мѣдная проволока толщиной въ 1—2 см. даетъ едва замѣтную разницу въ плотности тока во внутреннихъ и внѣшнихъ ея слояхъ; по оси плотности тока лишь на нѣсколько процентовъ меньше, чѣмъ на поверхности. Но если число періодовъ достигаетъ 10^6 въ секунду, то въ мѣди токъ ограничивается преимущественно поверхностнымъ слоемъ толщиной въ 0,1—0,2 мм., а при еще большихъ частотахъ проводящій слой сокращается до нѣсколькихъ микроновъ (1 микронъ = 0,001 мм.).

Отсюда вытекаетъ весьма важное въ практическомъ отношеніи слѣдствіе: во первыхъ, при быстрыхъ электрическихъ колебаніяхъ омическое сопротивленіе проволоки гораздо больше, нежели при постоянномъ токѣ; во-вторыхъ, у быстрыхъ электрическихъ колебаній омическое сопротивленіе зависитъ не отъ поперечнаго сѣченія проводника, какъ въ случаѣ постояннаго тока, но отъ его поверхности. Тонкостѣнная трубка представляетъ для колебаній такое же сопротивленіе, какъ и массивная проволока изъ того же матеріала и одинаковаго внѣшняго діаметра. Поэтому брать толстыя проволоки съ цѣлью уменьшить сопротивленіе значило бы понапрасну терять матеріаль. Весьма выгодными проводниками для колебаній высокой частоты являются широкія полосы изъ тонкихъ металлическихъ листовъ. Въ техникѣ безпроводочной телеграфіи пользуются тонко подраздѣленными проводниками, составленными изъ отдѣльныхъ изолированныхъ чрезвычайно тонкихъ мѣдныхъ нитей.

Проводники съ незначительной проводимостью, напримѣръ, электролиты, обладаютъ лишь малымъ экранирующимъ дѣйствіемъ. Напримѣръ, колебаніе въ 10^6 періодовъ проникаетъ въ наиболѣе хорошо проводящіе водные растворы на глубину въ 10 см. и еще глубже, ослабѣвая лишь на немного процентовъ.

ТРАНСФОРМАТОРЪ ТЕСЛА.

409. Переменный токъ высокой частоты въ разрядной цѣпи лейденской банки можно трансформировать на болѣе высокія напряжения совершенно такимъ же образомъ, какъ и переменный токъ малаго числа періодовъ. Однако, трансформаторы для высокыхъ частотъ, трансформаторы Тесла, въ одномъ пунктѣ существенно отличаются отъ трансформаторовъ для меньшихъ частотъ: они не имѣютъ желѣзнаго сердечника. Желѣзный сердечникъ въ обыкновенныхъ трансформаторахъ переменнаго тока имѣютъ цѣлью увеличивать индуктивныя напряжения настолько, чтобы омическія потери на-

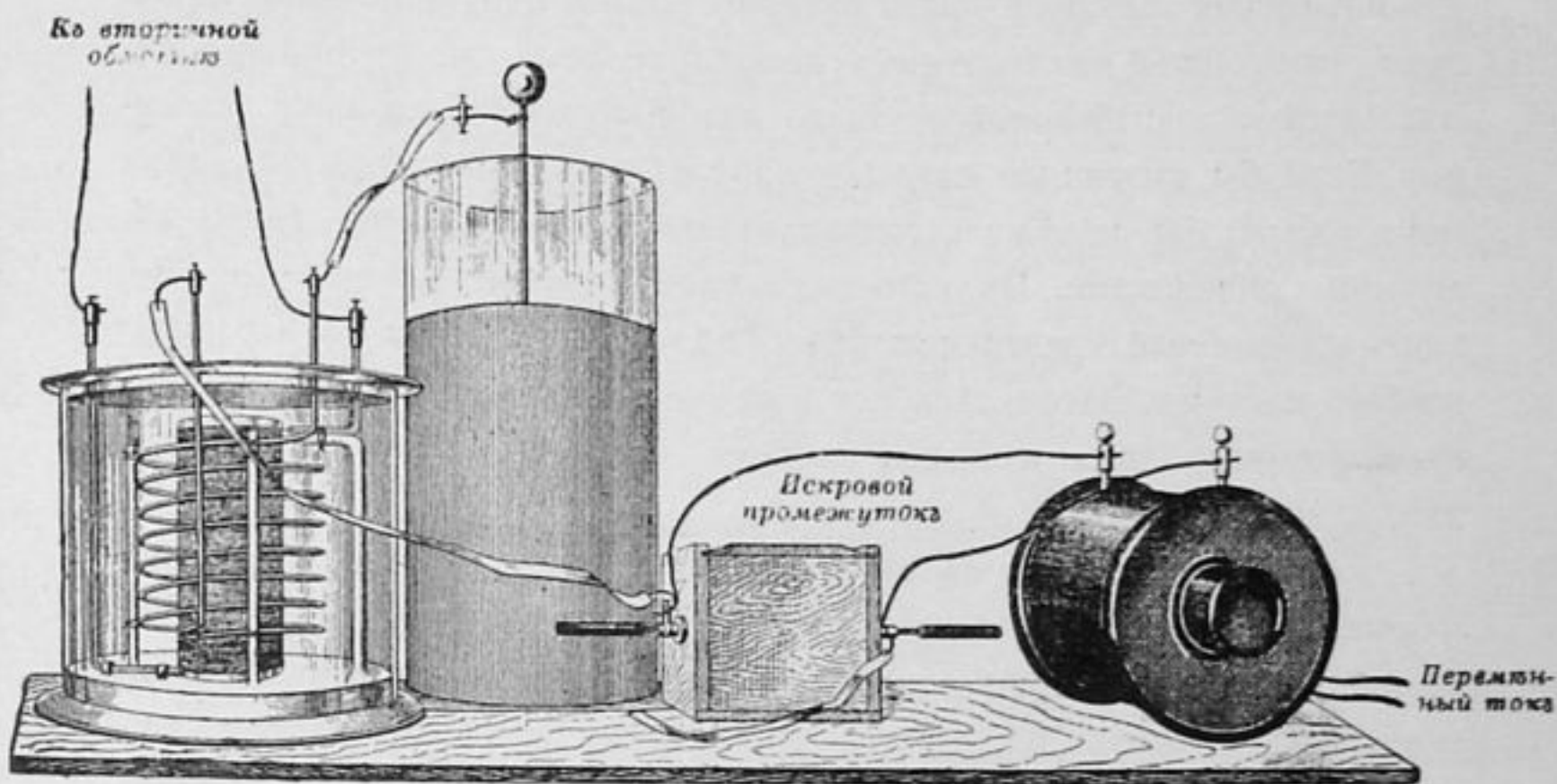


Рис. 311. Трансформаторъ Тесла.

пряженія сравнительно съ ними были ничтожно малы, и чтобы индуктивная связь вслѣдствіе этого сопровождалась весьма малыми потерями энергіи. При весьма большихъ частотахъ индуктивныя напряжения, какъ можно заключить изъ фактовъ, описанныхъ въ §§ 406 и 407, и безъ желѣзнаго сердечника преобладаютъ настолько, что въ немъ нѣтъ никакой необходимости. Если бы такой трансформаторъ снабдить желѣзнымъ сердечникомъ, то это оказалось бы скорѣе вреднымъ, нежели полезнымъ. Даже если бы сердечникъ былъ изготовленъ изъ тонкихъ изолированныхъ желѣзныхъ проволокъ, то въ отдѣльныхъ проволокахъ возникали бы столь сильные вихревые токи, что, во-первыхъ, не происходило бы никакого существеннаго усиленія

магнитнаго поля и его индуктивныхъ напряженій вслѣдствіе того, что проволоки экранируются вихревыми токами отъ поля, и, во-вторыхъ, нагрѣваніе вихревыми токами вызывало бы значительную потерю энергии.

Весьма употребительная форма трансформатора Тесла представлена на рис. 311. Емкостью служитъ лейденская банка; искровой промежутокъ заключаютъ въ деревянный ящикъ, чтобы при опытахъ не мѣшала его рѣзкій свѣтъ. Самоиндукція колебательной цѣпи, служащая также первичной катушкой трансформатора, состоитъ изъ небольшого числа витковъ весьма толстой негибкой мѣдной проволоки. Вторичная обмотка, окруженная первичной обмоткой, состоитъ изъ весьма большого числа витковъ тонкой изолированной проволоки, намотанной на стеклянный цилиндръ. Весь трансформаторъ помещается въ парафиновое масло для достиженія хорошей изоляціи. Если бы вторичная катушка помѣщалась въ воздухѣ, то невозможно было бы избѣжать разрядовъ между ея тонкими, густо навитыми проволоками. Въ установкѣ, изображенной ниже на рис. 326, виденъ подобный трансформаторъ Тесла безъ сосуда съ парафиновымъ масломъ. Зато здѣсь вся вторичная катушка залита твердымъ парафиномъ, такъ что она имѣетъ видъ толстаго парафиноваго стержня.

Если присоединить въ воздухѣ ко вторичнымъ зажимамъ трансформатора Тесла тонкія проволоки, то онѣ цѣликомъ покрываются свѣтло тонкихъ свѣтящихся линий и получаютъ видъ тонкихъ вѣтокъ, покрытыхъ инеемъ. Эту нѣжную свѣтящуюся паутину образуютъ пути разряда. Какъ высокія напряженія около провода трансформатора, можно видѣть, если приблизить къ нему эвакуированную стеклянную трубку безъ электродовъ. Она вспыхиваетъ тлѣющимъ свѣтомъ, совершенно ее заполняющимъ.

Интересно, что эти высокія переменныя напряженія производятъ лишь слабыя фізіологическія дѣйствія. Можно дотрагиваться рукой до полюсовъ трансформатора Тесла, можно пропускать черезъ руку искры длиною въ нѣсколько сантиметровъ, не испытывая при этомъ электрическаго толчка. Что при этомъ черезъ тѣло дѣйствительно проходятъ электрическіе токи, видно изъ того, что, если въ одной рукѣ держать эвакуированную трубку, а другою касаться полюса трансформатора Тесла, то трубка ярко вспыхиваетъ. Отсутствіе фізіологическаго дѣйствія, вѣроятно, объясняется тѣмъ, что при малой силѣ тока во вторичной катушкѣ количество электричества, про-

ходящее за весьма короткое время одного полупериода в одном направлении, настолько ничтожно, что вызываемое им в нашем теле электролитическое разложение меньше того, которое необходимо для возбуждения нервов. Отсутствие физиологического действия, во всяком случае, связано с высокой частотой колебаний.

Часто пользуются, вместо обычного трансформатора или индуктора, трансформатором Тесла, чтобы при помощи его разрядов получать электрические колебания чрезвычайно высокой частоты (10^8 и больше периодов в секунду). Он дает, во-первых, весьма высокие разрядные напряжения и потому весьма деятельные искры небольшого сопротивления. Во-вторых, число искр в секунду в этом случае очень велико, а именно, равняется числу колебаний; так как каждая искра сопровождается рядом требуемых колебаний высокой частоты, то энергия этих колебаний, приходящаяся на секунду, весьма велика. Во всех случаях, когда нужно измерить колебания весьма высокого числа периодов при помощи термоэлемента или нагревающейся проволоки, по указанным причинам удобно вызывать колебания при помощи разрядов аппарата Тесла, имеющих несколько миллионов периодов в секунду.

КОЛЕБАНИЯ ПРИ ИСЧЕЗНОВЕНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

410. Подобно тому, как при внезапном коротком замыкании электрическая энергия конденсатора прежде всего преобразуется в магнитную энергию и возникают электрические колебания, точно так же, если внезапно прервать электрический ток, из энергии магнитного поля тока получается электрическая энергия, так как в месте перерыва вследствие самоиндукции образуется сильное электрическое поле и могут возникнуть также электрические колебания. Для их возбуждения нужно при помощи емкости, присоединенной параллельно месту перерыва, воспрепятствовать тому, чтобы чрезмерно возросли напряжения и энергия поля тотчас же уничтожалась через процессы разряда. В § 382 мы видели, что в индукционных аппаратах по большей части параллельно месту перерыва первичной катушки присоединяется конденсатор достаточно большой емкости. Поэтому разрыв первичного тока сопровождается электрическими колебаниями, при чем конденсатор вследствие самоиндукции сначала заряжается, затем разря-

жается, вновь заряжается и т. д. Эти колебания, конечно, весьма сильно затухают, и напряжение индукционного аппарата возрастает особенно высоко лишь в течение первого полупериода, когда первичный ток падает до нуля и затѣмъ обращается; однако, и послѣдующія переменныя напряжения часто бываютъ замѣтны. Въ гейслеровыхъ трубкахъ, соединенныхъ съ индукционнымъ аппаратомъ, въ тѣхъ случаяхъ, когда ихъ разрядное напряжение не слишкомъ высоко, часто наблюдается не желаемый односторонній разрядъ, но переменный токъ. Въ этихъ случаяхъ оба электрода одновременно

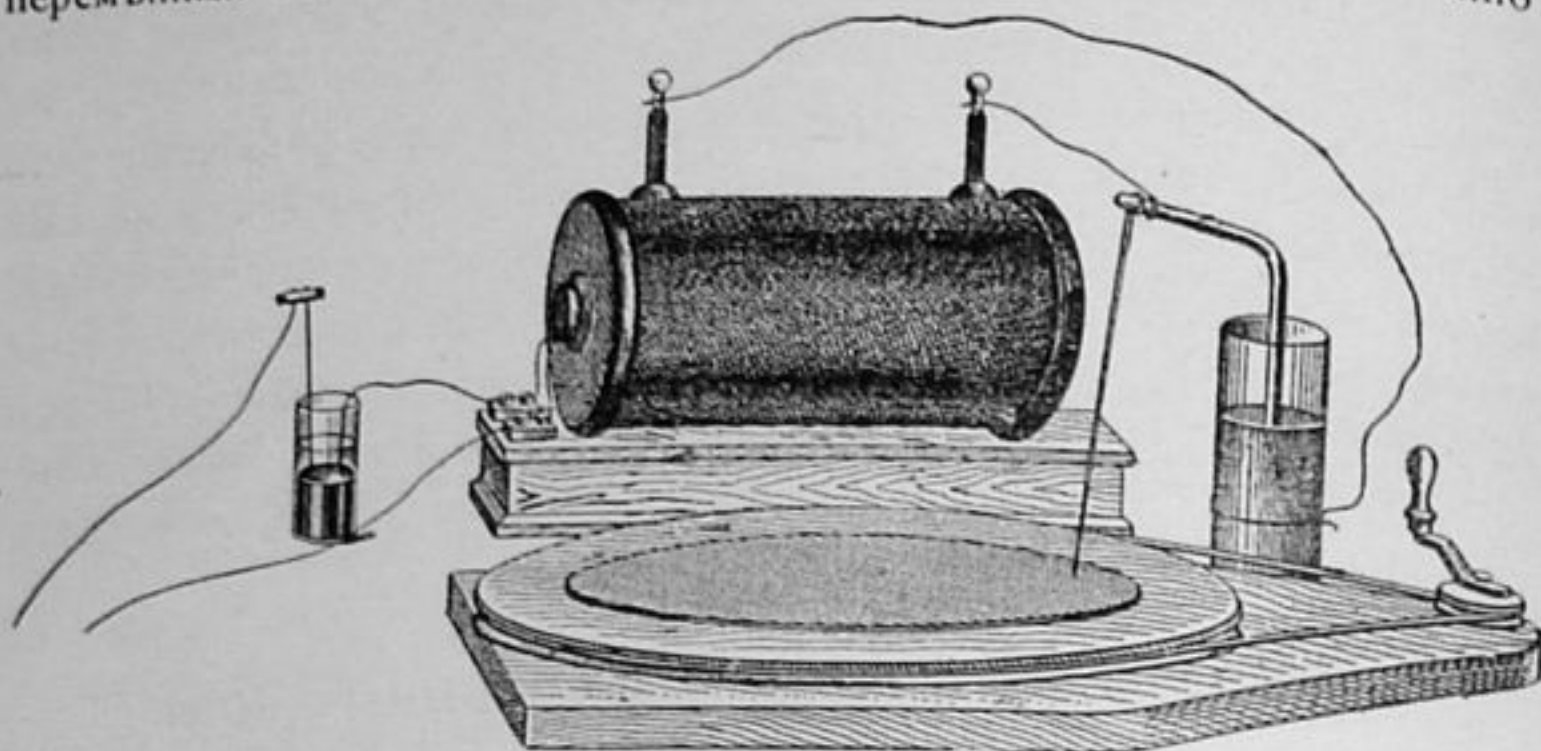


Рис. 312. Демонстрація колебаній, возникающихъ при исчезновении магнитнаго поля, по Кенигу.

обнаруживаютъ признаки анода и катода, но всегда, однако, разрядъ обладаетъ большей интенсивностью въ одномъ направленіи, а именно, въ направленіи первого полуколебанія.

Колебания, возникающія при внезапномъ исчезновении магнитнаго поля, въ случаѣ, когда имѣется параллельно присоединенная емкость, могутъ быть легко продемонстрированы на интересномъ опытѣ, описанномъ Кенигомъ (W. König). Какъ показываетъ рис. 312, вторичные зажимы индуктора соединяются съ обкладками лейденской банки. Въ первичную цѣпь не включаютъ автоматическаго прерывателя, а лишь ртутную чашку для того, чтобы одинъ разъ прервать токъ. Когда прекращается токъ первичной цѣпи, возникаетъ токъ во вторичной цѣпи, такъ какъ магнитное поле не можетъ исчезнуть само по себѣ; лейденская банка заряжается, и только возникающее при этомъ электрическое напряжение приводитъ магнитное

поле въ состояніе покоя. Послѣ этого лейденская банка вновь разряжается и такимъ образомъ возникаетъ рядъ колебаній. Если внутреннюю обкладку банки соединить съ остриемъ, подъ которымъ при помощи вращающаго аппарата быстро вращается эбонитовый дискъ, то на него при каждомъ колебаніи переходитъ небольшой разрядъ, и на дискѣ получаютъ въ правильной послѣдовательности продолговатые пятна то съ положительными, то съ отрицательными зарядами. Чтобы сдѣлать ихъ видимыми, посыпаютъ пластинку изобрѣтеннымъ Лихтенбергомъ порошкомъ изъ сѣры и сурика. Этотъ порошокъ обладаетъ тѣмъ свойствомъ, что при контактѣ частички сѣры заряжаются отрицательнымъ электричествомъ, а частички сурика — положительнымъ электричествомъ. На эбонитовомъ дискѣ положительно заряженныя полосы получаютъ отъ сѣры желтый цвѣтъ, а отрицательно заряженныя — красный отъ сурика.

ГУДОКЪ (ЗУММЕРЪ).

411. Зуммеръ представляетъ собою небольшой инструментъ, помощью котораго можно получить равномерный звукъ; иногда зуммеръ употребляется въ телефонѣ, вмѣсто сигнальнаго звонка. Дѣйствіе зуммера основано на возбужденіи электрическихъ колебаній переменнымъ магнитнымъ полемъ. Какъ показываетъ рис. 313, зуммеръ въ извѣстной степени представляетъ собой одновременно микрофонъ и телефонъ. Въ микрофонную цѣпь включена первичная катушка небольшого трансформатора; его вторичная катушка соединена черезъ телефонную катушку съ обоими рядами пластинъ конденсатора. Когда первичная цѣпь замыкается, то во вторичной цѣпи возникаютъ электрическія колебанія, такъ какъ конденсаторъ заряжается вслѣдствіе индукціоннаго дѣйствія при замыканіи тока. Число періодовъ этихъ колебаній опредѣляется самоиндукціей вторичной катушки и емкостью включеннаго конденсатора. Такъ какъ токъ вторичной катушки проходитъ черезъ телефонъ инструмента, то электрическія колебанія приводятъ желѣзную телефонную мембрану въ колебанія съ одинаковымъ числомъ періодовъ. Телефонная мембрана имѣетъ снизу посрединѣ небольшую угольную пластинку и одновременно служитъ также и микрофонной мембраной; телефонный магнитъ имѣетъ форму полаго цилиндра, внутри котораго вдѣланъ микрофонный угольный контактъ. Такъ какъ микрофонъ включенъ въ первичную цѣпь и колебанія микрофона имѣютъ такое же число

періодовъ, какъ и собственныя колебанія вторичной цѣпи, то оба колебанія взаимно усиливаются вслѣдствіе резонанса, и инструментъ звучитъ все время, пока первичный токъ остается замкнутымъ. Зуммеръ часто примѣняется при измѣреніяхъ, когда требуются весьма чистыя синусоидальныя колебанія, такъ какъ его колебанія отличаются

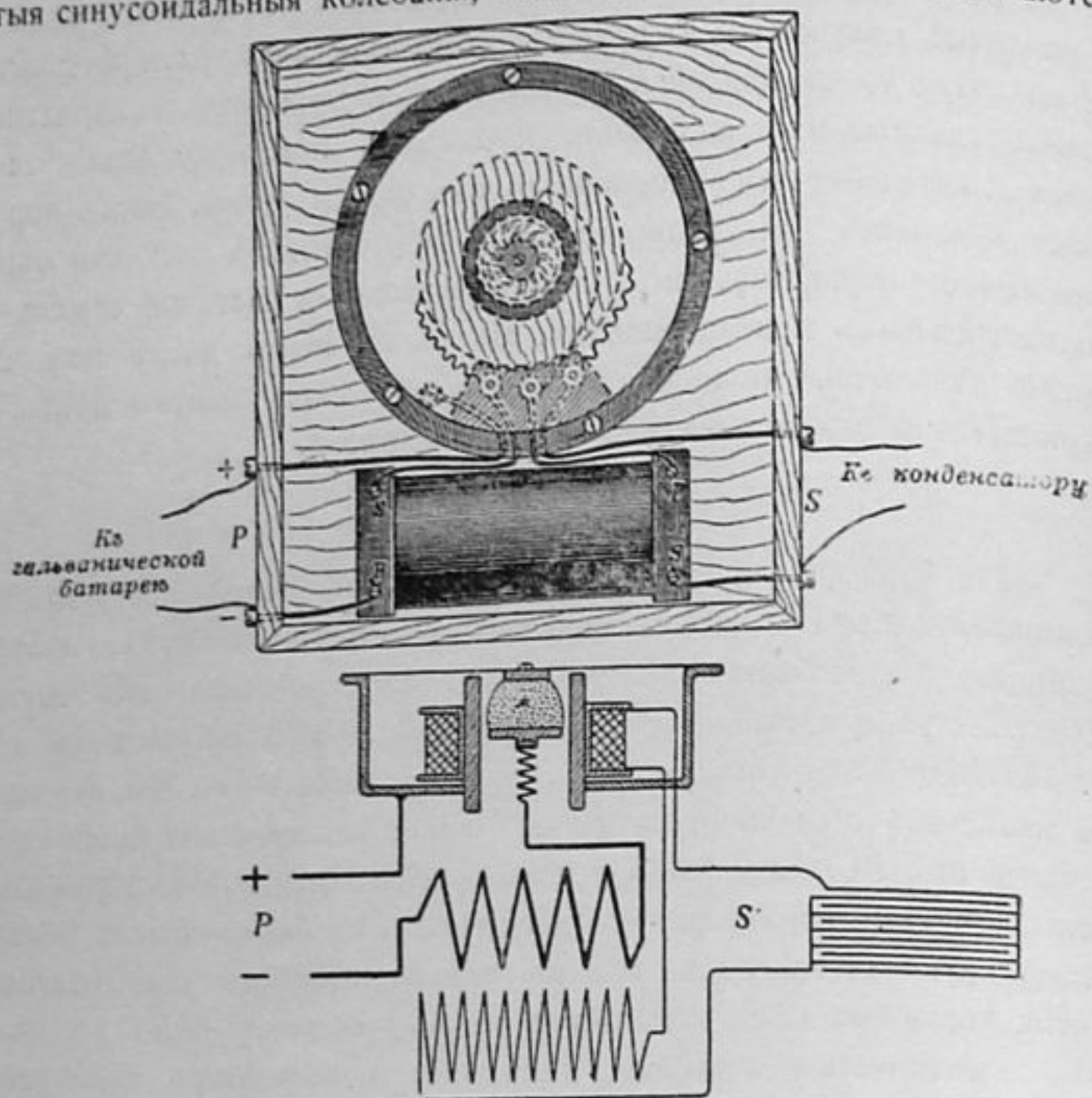


Рис. 313. Зуммеръ и схема его включения.

чистотой. Кромѣ того, число его періодовъ можно съ удобствомъ мѣнять въ широкихъ предѣлахъ, измѣняя включенную во вторичную цѣпь емкость.

КОЛЕБАНИЯ СВѢТОВОЙ ДУГИ.

412. Какъ мы видѣли въ § 190, свѣтовая дуга должна стать прерывающейся, если параллельно ей включена большая емкость. Если въ параллельное дугѣ отвлѣтленіе включить емкость въ нѣсколько микрофарадъ и, кромѣ того, самоиндукцію въ нѣсколько

миллигенри, то возникаютъ сравнительно медленные колебанія, которыя тотчасъ проявляются въ томъ, что свѣтовая дуга начинаетъ издавать соотвѣтственный тонъ (ср. § 189). Для удачи опыта необходимо, чтобы самоиндукціонная катушка не поглощала много энергіи, т.-е. чтобы она состояла изъ витковъ довольно толстой мѣдной проволоки и не имѣла желѣзнаго сердечника. Кромѣ того, свѣтовая дуга должна быть довольно неустойчивой. Если берутъ угольные электроды, то они должны быть сдѣланы не изъ „угля съ фитилемъ“, обычно употребляемаго для анода въ лампахъ, но изъ такъ называемаго гомогеннаго угля, на которомъ свѣтовая дуга не держится такъ прочно, какъ на мягкомъ углѣ съ фитилемъ. Источникъ электричества долженъ имѣть достаточно высокое напряженіе, во

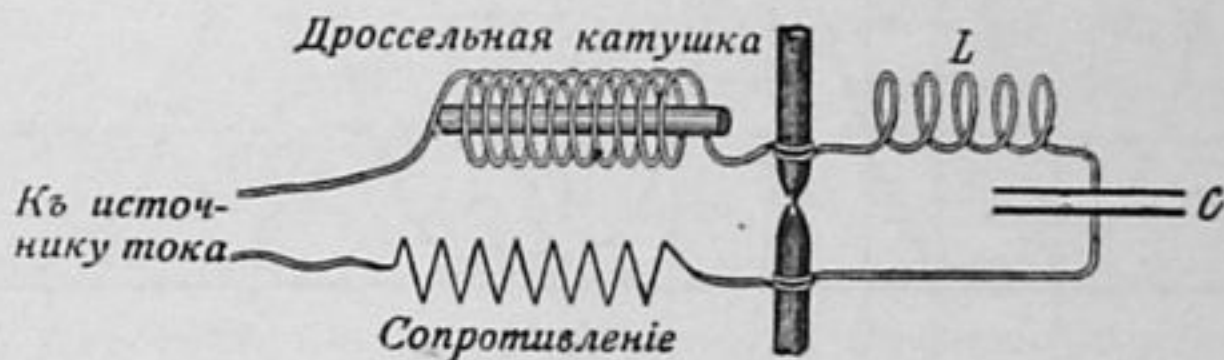


Рис. 314. Схема включенія звучащей свѣтовой дуги.

всякомъ случаѣ, въ нѣсколько сотъ вольтъ, и въ провода должно быть включено большое сопротивленіе. Благодаря этому свѣтовая дуга можетъ горѣть при слабомъ токѣ и не тухнетъ легко, какъ это имѣло бы мѣсто при низкомъ напряженіи. Слабый токъ благоприятенъ для колебаній, такъ какъ онъ лишь незначительно нагреваетъ угольную острію, и потому дуга весьма неустойчива. Кромѣ того, полезно еще включить въ провода дроссельную катушку (рис. 314), чтобы колебанія по возможности хорошо поглощались и не отнимались отъ конденсаторной цѣпи. Такимъ путемъ Дуддель (Duddell) впервые получилъ и наблюдалъ колебанія.

Болѣе тщательное изслѣдованіе колеблющейся свѣтовой дуги было произведено впервые Г. Т. Симономъ. Кривыя, представленныя на рис. 315, были сняты имъ при помощи двойного осциллографа (ср. § 286) со звучащей угольной свѣтовой дуги. Кривая, обозначенная буквой J , даетъ дуговой токъ; кривая V' — электрическое напряженіе между электродами свѣтовой дуги, а кривая V_1 — напряженіе между пластинами конденсатора. Двѣ первыя кривыя

заимствованы изъ работы Симона, послѣдняя же вычислена изъ первыхъ по даннымъ его опытовъ. Въ проводъ отъ источника тока была включена такая самоиндукція, что токъ почти постоянно равнялся 2,2 амперамъ; такова же средняя сила тока, проходившаго чрезъ свѣтовую дугу. Если принять прямую $J_0 = 2,2$ за нулевую

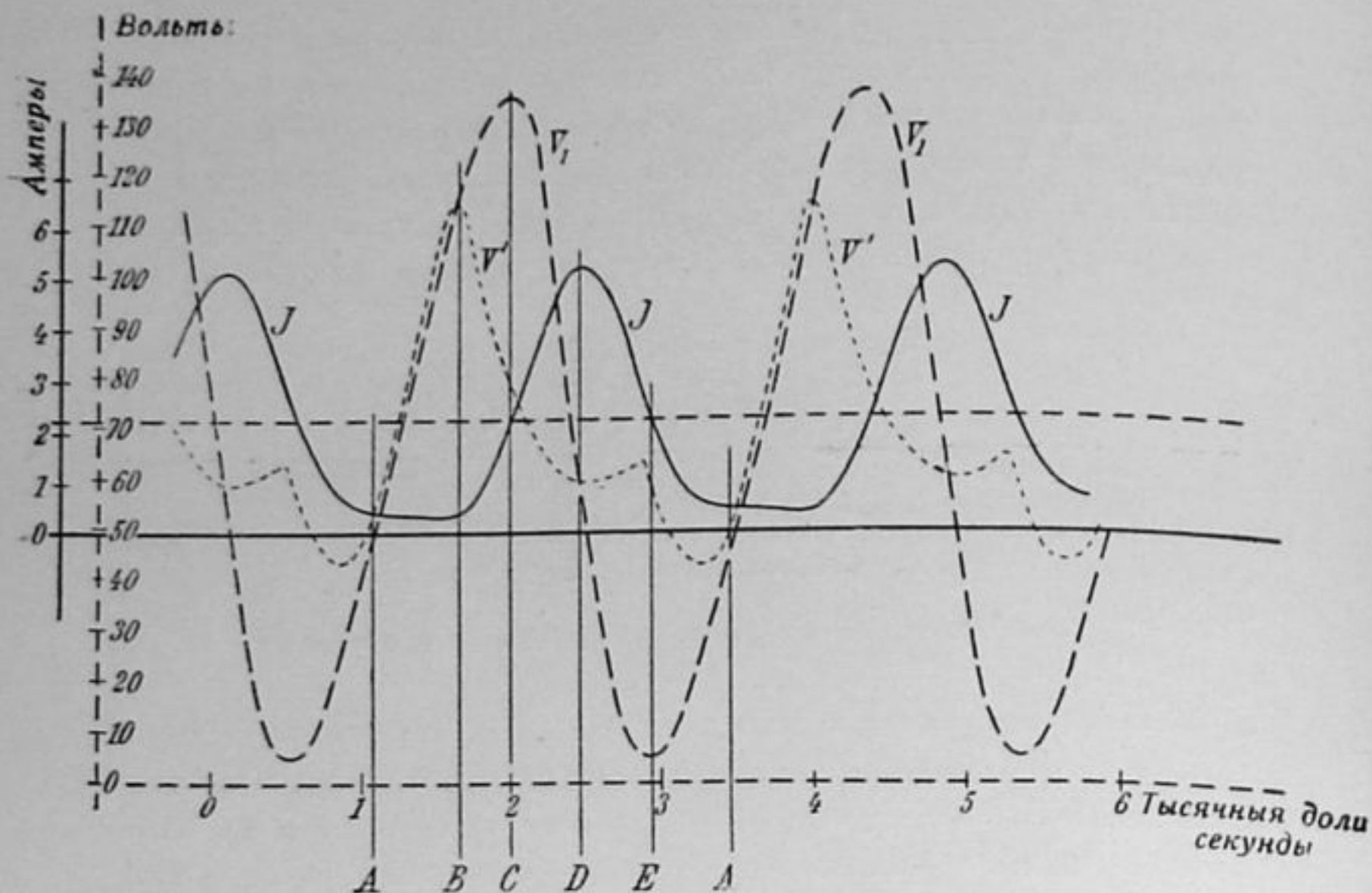


Рис. 315. Кривыя силы тока и напряженія звучащей свѣтовой дуги.

Средняя сила тока 2,2 амп., среднее напряженіе 71 в., напряженіе источника тока 220 в., длина свѣтовой дуги 3 м.м., емкость 14 МФ., самоиндукція 0,005 генри, число колебаній 420.

— сила тока J
 напряженіе свѣтовой дуги V
 - - - - - вычисленное напряженіе V_1 конденсатора. } по Симону.

Симонъ для трехъ послѣднихъ величинъ даетъ значенія 15 МФ, 0,007 Н и 450; мы нѣсколько измѣнили ихъ для того, чтобы кривыя согласовались между собою.

ось, то кривая J непосредственно представитъ намъ переменный токъ въ конденсаторной цѣпи, который въ свѣтовой дугѣ налагается на токъ $J_0 = 2,2$. Среднее значеніе напряженій достигало 71 вольта; обѣ кривыя напряженій проведены такъ, что прямая $V_0 = 71$ вольту совпадаетъ съ прямою $J_0 = 2,2$ амперъ. Явленіе звучащей дуги протекаетъ слѣдующимъ образомъ. Когда свѣтовая дуга еще не горитъ,

въ пластины конденсатора проходитъ постоянный токъ J_0 , который его и заряжаетъ. При этомъ напряженія находятся въ статическомъ равновѣсїи, такъ какъ магнитное поле не измѣняется; такимъ образомъ, если пренебречь небольшой потерей напряженія вслѣдствіе омическаго сопротивленія, то имѣеть мѣсто равенство $V_1 = V'$. Это продолжается до тѣхъ поръ, пока конденсаторъ не зарядится до напряженія, вызывающаго воспламененіе свѣтовой дуги; въ этотъ моментъ начинается разрядъ черезъ свѣтовую дугу и вмѣстѣ съ тѣмъ новая стадія явленія. Если свѣтовая дуга уже горѣла раньше, то, какъ мы знаемъ (§ 193), напряженіе, необходимое для воспламененія, довольно низко; кривая V' на рис. 315 даетъ 113 вольтъ. Часть AB на рис. 315 соотвѣтствуетъ описанному сейчасъ процессу заряженія. При опытѣ, которому соотвѣтствуетъ рис. 315, дуговой промежутокъ не былъ вполнѣ лишенъ тока — онъ слегка проводилъ, такъ какъ электроды были еще накалены отъ предыдущаго разряда; поэтому все время черезъ него шелъ слабый и почти постоянный токъ (около 0,4 амперъ). Этотъ токъ лишь слегка понижалъ зарядный токъ, но, кромѣ этого, никакого вліянія на процессъ не имѣлъ. Продолжительность этого періода заряженія зависитъ отъ силы тока $J_0 - J'$, емкости конденсатора и величины напряженія, необходимой для воспламененія дуги. Когда это напряженіе достигнуто, устанавливается настоящая свѣтовая дуга, и, пока въ ней возрастаетъ токъ, разрядное напряженіе значительно понижается. Вслѣдствіе этого между конденсаторомъ и электродами возникаетъ разность напряженій $V_1 - V'$, поддерживающая магнитное поле тока въ самоиндукціонной катушкѣ и такимъ образомъ вызывающая паденіе заряднаго тока конденсатора въ такой мѣрѣ, въ какой возрастаетъ токъ въ свѣтовой дугѣ. Сумма обоихъ токовъ постоянна и равна J_0 . Вскорѣ (C на рис. 315) токъ въ конденсаторной цѣпи совершенно исчезаетъ, а токъ въ свѣтовой дугѣ достигаетъ величины J_0 . Въ этотъ моментъ зарядъ конденсатора достигаетъ максимума, и конденсаторъ начинаетъ разряжаться, вслѣдствіе чего токъ въ свѣтовой дугѣ превыситъ значеніе J_0 . Разрядный токъ возрастаетъ и достигаетъ максимума, когда конденсаторъ разрядится до напряженія свѣтовой дуги (D на рис. 315). Съ этого момента токъ убываетъ, такъ какъ между конденсаторомъ и электродами образуется противоположно направленная разность напряженій $V_1 - V'$. Когда токъ упадетъ до J_0 , разрядъ конденсатора прекращается, и его напряженіе достигаетъ мини-

му (Е на рис. 315, 5 вольтъ). Въ теченіе разряда (отъ С до Е) напряженіе свѣтовой дуги колеблется лишь незначительно въ сравненіи съ сильнымъ измѣненіемъ напряженія конденсатора, и весь процессъ поэтому протекаетъ совершенно такъ же, какъ полъ-периода колеблющейся искры. Продолжительность процесса между С и Е поэтому можетъ быть вычислена по формулѣ $\frac{\tau}{2} = \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$, что даетъ въ нашемъ случаѣ $0,91 \cdot 10^{-3}$ секунды, величину, согласующуюся съ длиною отрѣзка СЕ на рис. 315. Во вторую половину процесса разряда (DE) напряженіе свѣтовой дуги вновь возрастаетъ вслѣдствіе уменьшенія дугового тока, но не достигаетъ той высоты, которую оно имѣло вначалѣ, въ точкѣ С, такъ какъ тѣмъ временемъ электроды успѣли сильнѣе накалиться подѣ дѣйствіемъ свѣтовой дуги, и потому іонизація сильнѣе, нежели въ С. Это явленіе послѣдствія, о которомъ мы уже упоминали въ § 193, Симонъ называетъ гистерезисомъ свѣтовой дуги. Гораздо сильнѣе еще оно обнаруживается въ слѣдующій, послѣдній процессъ колебанія EA, когда конденсаторъ начинаетъ вновь заряжаться и дуговой токъ поэтому сильно понижается благодаря параллельно включенному зарядному

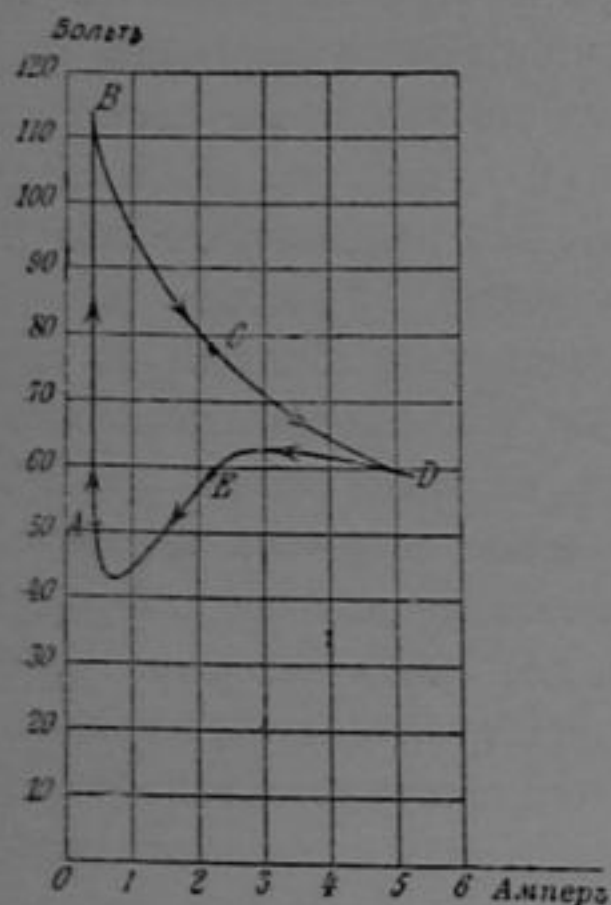


Рис. 316. Кривая напряженія и силы тока свѣтовой дуги при колебаніи, представленномъ на рис. 315.

току. Изъ рис. 315 видно, что тамъ, гдѣ дуговой токъ J падаетъ очень быстро — около точки Е — кривая напряженія вообще перестаетъ подыматься. По достиженіи максимума она внезапно падаетъ вмѣстѣ съ кривою тока совершенно такъ, какъ если бы свѣтовая дуга подчинялась закону Ома. Это является слѣдствіемъ имѣющейся еще іонизаціи газоваго участка и высокой температуры электродовъ, которыя не исчезаютъ сейчасъ же съ уменьшеніемъ дугового тока. Но такъ какъ при слабомъ токѣ и слабомъ напряженіи дуговому промежутку доставляется мало энергіи, то за промежутокъ времени EA температура и іонизація въ концѣ все же очень падаютъ, свѣтовая дуга почти тухнетъ,

и остается лишь небольшой остаточный токъ, въ нашемъ примѣрѣ

равный 0,4 ампера. Такъ въ промежутокъ EA готовится фаза заряженія AB , которой мы начали описаніе. Гистерезисъ свѣтовой дуги при электрическомъ колебаніи выступаетъ особенно отчетливо, если построить кривую напряженій и силъ тока, какъ на рис. 316. Очевидно ея сходство съ кривой рис. 127, если принять во вниманіе различіе масштабовъ. Заряженіе конденсатора, происходящее цѣликомъ между E и C , въ противоположность разряду (CE) не слѣдуетъ закону искровыхъ колебаній. Напримѣръ, продолжительность процесса AB , какъ мы уже указали, зависитъ отъ величины постоянной силы тока $J_0 - J'$, т.-е. между прочимъ и отъ сопротивленій въ проводахъ, идущихъ отъ источника тока, но не отъ самоиндукціи конденсаторной цѣпи. Кромѣ того, продолжительность промежутка AB зависитъ также отъ напряженія, необходимаго для возникновенія свѣтовой дуги, а такъ какъ это напряженіе зависитъ отъ природы электродовъ, длины дугового промежутка и силы дугового разряда въ предыдущее колебаніе, то трудно достигнуть, чтобы полная продолжительность колебанія звучащей свѣтовой дуги была совершенно постоянной. При каждомъ измѣненіи и перемѣщеніи свѣтовой дуги немного измѣняется также и продолжительность колебанія. Она всегда нѣсколько больше количества, вычисленнаго по формулѣ Томсона $\tau = 2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$, такъ какъ при заряженіи неизбежно протекаетъ промежутокъ AB , въ теченіе котораго токъ приблизительно постояненъ. Поэтому кривая тока при заряженіи, т.-е. отъ E до C , должна быть болѣе плоской и широкой, нежели при разряженіи отъ C до E , гдѣ она имѣетъ правильную синусоидальную форму. Такъ какъ промежутокъ времени CE равняется $\pi \cdot \sqrt{C \cdot L}$, то промежутокъ EC долженъ быть больше, чѣмъ $\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$, и весь процессъ поэтому долженъ длиться болѣе, нежели $2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$ секундъ. Въ случаѣ, представленномъ на рис. 315, $2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C} = 1,83 \cdot 10^{-3}$ сек., а продолжительность колебанія равна $2,83 \cdot 10^{-3}$ сек.

413. Описаннымъ сейчасъ образомъ происходятъ электрическія колебанія въ конденсаторной цѣпи, присоединенной параллельно къ свѣтовой дугѣ; они продолжаются все время, пока свѣтовая дуга горитъ, подобно тому, какъ механическія колебанія въ воздушномъ столбѣ органной трубы длятся все время, пока производится вдуваніе. Подобно тому, какъ въ органной трубѣ сила вдуваемаго тока имѣетъ рѣшающее значеніе для возникновенія колебаній, такъ въ случаѣ

колеблющейся свѣтовой дуги эту роль играетъ сила тока дуги. Если токъ слишкомъ слабъ, то во время заряда конденсатора электроды охлаждаются столь значительно, что напряженіе, необходимое для воспламененія дуги, превышаетъ наличное напряженіе, вслѣдствіе чего свѣтовая дуга окончательно тухнетъ. Если же сила тока слишкомъ велика, то электроды нагрѣваются столь сильно, что быстрыя колебанія тока не могутъ вызвать охлажденія, необходимаго для возникновенія длительныхъ колебаній, и дуга горитъ тогда непрерывно, безъ колебаній. Легче всего получаютъ сравнительно медленныя коле-

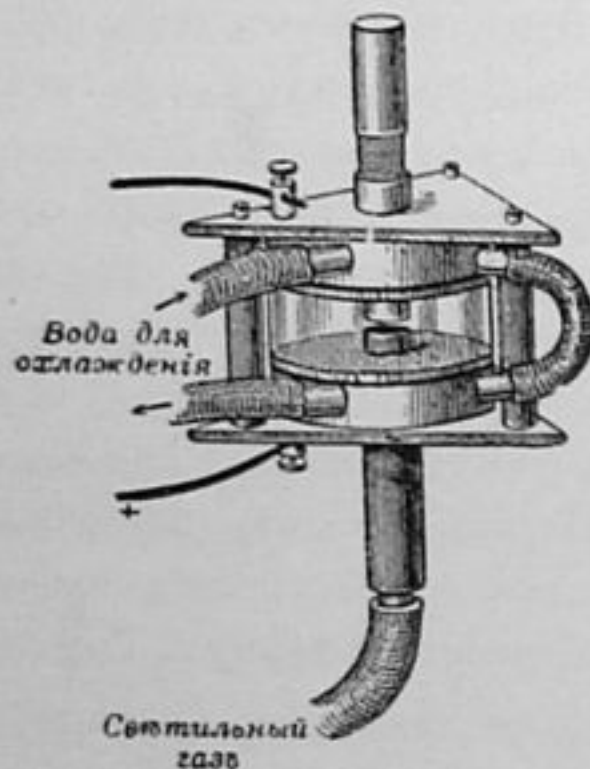


Рис. 317. Лампа Поульсена для лабораторныхъ опытовъ.

банія, въ особенности если пользоваться весьма большими емкостями и сравнительно малыми самоиндукціями.

Если желательно получить быстрыя колебанія, то прежде всего слѣдуетъ позаботиться объ очень хорошемъ охлажденіи электродовъ для того, чтобы температура ихъ могла точно слѣдовать за колебаніями тока. Это было впервые достигнуто на практикѣ Поульсеномъ (Poulsen). На рис. 317 изображена лампа Поульсена въ формѣ весьма удобной для демонстрацій. Одинъ электродъ представляетъ собою толстый мѣдный стержень, на которомъ

сдѣлана винтовая нарѣзка, такъ что вращеніемъ въ гайкѣ его можно очень медленно передвигать впередъ или назадъ. Другой электродъ представляетъ собою угольный стержень, имѣющій каналъ вдоль оси, и одновременно служитъ подводящей трубкой для свѣтильнаго газа или водорода, которымъ наполняется сосудъ, гдѣ горитъ свѣтовая дуга. Благодаря примѣненію мѣднаго стержня и легкаго газа, т.-е. веществъ, хорошо проводящихъ теплоту, электроды при пониженіи силы тока тотчасъ же охлаждаются. Для того, чтобы вся лампа съ теченіемъ времени не накалялась, въ ней имѣется еще приспособленіе для охлажденія водой. Свѣтовая дуга Поульсена должна быть очень коротка и горѣть при высокомъ напряженіи; важно также тщательно регулировать силу тока. Если желательно достигнуть очень быстрыхъ колебаній, то слѣдуетъ, какъ указано на рис. 317, мѣдный стержень дѣлать катодомъ, такъ какъ катодъ

свѣтовой дуги особенно чувствителенъ къ колебаніямъ температуры (§ 185). Если переключить электроды, то нельзя уже достигнуть столь высокаго числа колебаній, но зато въ этомъ случаѣ дуга горитъ спокойнѣе и не такъ легко тухнетъ.

Съ помощью лампы Поульсена легко получаютъ колебанія такой частоты, какъ колебанія Тесла (около 10^6 въ секунду). Кривыя колебаній лампы Поульсена отличаются отъ кривыхъ рис. 315, соотвѣтствующихъ колебаніямъ угольной свѣтовой дуги, прежде всего тѣмъ, что измѣненія напряженія на нихъ значительно больше вслѣдствіе повышенной величины напряженія, необходимаго для зажигания дуги. Конденсаторъ не только разряжается, но еще и заряжается противоположно; точно также и напряженіе у электродовъ на мгновеніе становится отрицательнымъ. Кромѣ того, когда напряженіе падаетъ до нуля и мѣняетъ знакъ, свѣтовая дуга почти совершенно тухнетъ вслѣдствіе хорошаго охлажденія электродовъ; во всякомъ случаѣ, остающаяся въ дугѣ сила тока значительно меньше, нежели въ колебаніяхъ, представленныхъ на рис. 315. Колебания, при которыхъ напряженіе на электродахъ никогда не достигаютъ нуля и токъ свѣтовой дуги не затухаетъ совершенно, называются колебаніями перваго рода, а колебанія, при которыхъ напряженіе у электродовъ переходитъ черезъ нуль и становится отрицательнымъ, при чемъ дуговой токъ почти совершенно прекращается, называются колебаніями второго рода.

414. Нѣчто совершенно отличное отъ описанныхъ колебаній представляютъ собою такъ называемыя колебанія третьяго рода; они получаютъ, если пользоваться весьма высокимъ напряженіемъ и весьма большимъ добавочнымъ сопротивленіемъ. Въ этомъ случаѣ происходитъ обычный прерывистый разрядъ, описанный въ § 169. Если емкость не слишкомъ мала, то тлѣющій разрядъ каждый разъ переходитъ въ свѣтовую дугу, и получается прерывистая свѣтовая дуга, состоящая изъ безчисленнаго множества быстро слѣдующихъ другъ за другомъ „частичныхъ разрядовъ“. Легче всего это удастся при металлическихъ электродахъ (ср. § 190), но особенной красотой и правильностью явленіе отличается при хорошо охлаждаемой ртутной лампѣ съ двумя ртутными электродами и короткой свѣтовой дугой. Впрочемъ, прерывистый характеръ свѣтовой дуги легко обнаружить по звучанію телефона, включеннаго въ проводъ, а въ случаѣ свободной дуги — по издаваемому ею шуму наподобіе шипѣнія. Каждый

малый частичный разрядъ представляетъ собою настоящую, хотя и слабую, электрическую искру и сопровождается небольшимъ числомъ сильно затухающихъ колебаній, продолжительность которыхъ можетъ быть вычислена посредствомъ формулы Томсона по даннымъ емкости и самондукціи отвѣтвленія. Хотя каждая отдѣльная искра развиваетъ лишь весьма малую энергію колебанія, однако, вслѣдствіе чрезвычайно большого числа искръ энергія колебаній, приходящаяся на секунду, можетъ оказаться достаточно большой, чтобы съ нею удобно было экспериментировать. Такимъ образомъ, колебанія свѣтовой дуги третьяго рода въ дѣйствительности являются лишь видоизмѣненіемъ искровыхъ колебаній, хотя чрезвычайно малая, слабо свѣтящая, слегка лишь шумящая прерывистая свѣтовая дуга внѣшнимъ образомъ совершенно отличается отъ яркой, громко и рѣзко трещащей искры, которою обычно возбуждаются искровыя колебанія. Въ послѣднее время особенно важное значеніе приобрѣли слабыя шипящія искры съ очень быстро затухающими колебаніями.

ВОЗБУЖДЕНІЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХЪ КОЛЕБАНІЙ ТОЛЧКАМИ.

415. Мы видѣли въ § 405, что посредствомъ тѣсной связи съ резонирующей колебательной цѣпью можно очень быстро отнять отъ электрическаго осциллятора его энергію колебанія. Въ томъ случаѣ, который представленъ кривыми въ § 405, примѣрно уже послѣ четырехъ полныхъ колебаній вся энергія переходитъ изъ первичной цѣпи во вторичную. Если первичная искра очень сильна, то искровой промежутокъ еще долгое время остается проводящимъ, хотя его сопротивление съ убываніемъ средней силы тока постепенно возрастаетъ; энергія колебанія много разъ переходитъ отъ первичной цѣпи во вторичную и обратно. Явленіе совершенно мѣняется, когда первичная искра представляетъ собою небольшую, слабую шипящую искру, которая производитъ у электродовъ весьма лишь незначительныя количества теплоты. Въ этомъ случаѣ легко достигнуть того, чтобы въ теченіе того времени, за которое энергія переходитъ во вторичную цѣпь, электроды совершенно охладились, такъ чтобы искровой промежутокъ при токъ, равномъ нулю, затухалъ, т.-е. совершенно терялъ проводимость и преграждалъ путь току. При этомъ энергія не можетъ уже вернуться въ первичную цѣпь и поэтому остается цѣликомъ во вторичной цѣпи, какъ показываетъ осциллограмма (рис. 318). Вторичная цѣпь является теперь осцилля-

торомъ, послѣ того какъ колебанія въ ней вызваны небольшимъ числомъ колебательныхъ толчковъ цѣпи съ затухающимъ искровымъ промежуткомъ. Здѣсь мы встрѣчаемся съ новымъ методомъ



Рис. 318. Возбужденіе колебаній толчками. Осциллограмма.

возбужденія электрическихъ колебаній—методомъ возбужденія толчками.

Возбужденіе толчками было изобрѣтено М. Виномъ (M. Wien) въ 1906 году. Осцилляторъ Вина представленъ схематически на

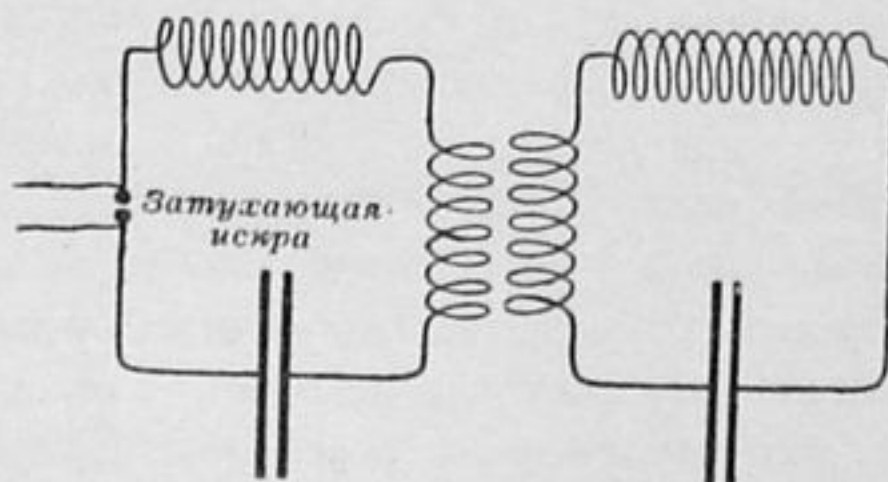


Рис. 319. Осцилляторъ съ возбужденіемъ толчками. Схема включенія.

рис. 319. Этотъ методъ имѣетъ особое значеніе, такъ какъ самый осцилляторъ не содержитъ искрового промежутка. Поэтому сопротивление въ колебательной цѣпи можно дѣлать произвольно малымъ и тѣмъ сильно уменьшать затуханіе. Такимъ образомъ, при помощи осциллятора Вина можно получать особенно длинные правильные ряды колебаній. Связь лучше всего устроить такъ, чтобы цѣпь съ

затухающей искрой возможно скорѣе отдавала свою энергію колебанія. Тогда потери въ ней и во всемъ аппаратѣ будутъ вообще очень малы, и можно будетъ, несмотря на низкое разрядное напряженіе короткаго искрового промежутка, получать большія количества энергіи для опытовъ.

Вмѣсто того, чтобы пользоваться въ возбуждающей цѣпи затуханіемъ самой искры, можно въ качествѣ задерживающаго клапана ввести въ цѣпь достаточно широкую гейслерову трубку, которая имѣетъ весьма малое сопротивленіе при прохожденіи черезъ нее сильныхъ токовъ, но, по прекращеніи тока, тотчасъ становится совершеннымъ изоляторомъ. Въ качествѣ искры возбудителя можно въ этомъ случаѣ взять сильную длинную искру, чтобы получить большія амплитуды, но при этомъ связь должна быть нѣсколько свободнѣе, нежели въ случаѣ возбудителя съ затухающей искрой, такъ чтобы большое количество энергіи болѣе постепенно переходило на осцилляторъ и чтобы это время было достаточно для полнаго затуханія гейслеровой трубки.

РЕЗОНАНСЪ КАТУШЕКЪ.

416. Если катушки трансформатора Тесла правильно подобраны, то можно достигнуть того, чтобы разомкнутая вторичная катушка безъ привключеннаго конденсатора резонировала на первичную цѣпь. Въ этомъ случаѣ свободные концы вторичной катушки образуютъ емкость. Но такъ какъ эта емкость очень мала, то самоиндукція катушки должна быть очень большой, т.-е. нужно взять очень большое число витковъ тонкой проволоки. Уже при очень слабыхъ токахъ въ этихъ виткахъ напряженія, до которыхъ заряжаются концы катушки, становятся вслѣдствіе ея малой емкости чрезвычайно высокими, и отъ катушки тогда исходятъ въ воздухъ искрящіеся разряды. На рис. 320 представленъ резонансовый трансформаторъ. Лишь небольшое число витковъ первичной катушки охватываетъ вторичную катушку, плотно обмотанную вокругъ стержня; большую часть первичной цѣпи составляетъ лежащая на столѣ спираль изъ не изолированной мѣдной проволоки. Помощью гибкаго провода можно коротко замыкать произвольное число ея витковъ и такимъ образомъ произвольно измѣнять самоиндукцію и, слѣдовательно, также число періодовъ колебаній. Нижній конецъ вторичной катушки соединенъ съ водопроводомъ, верхній, наоборотъ, изолированъ. Если теперь за-

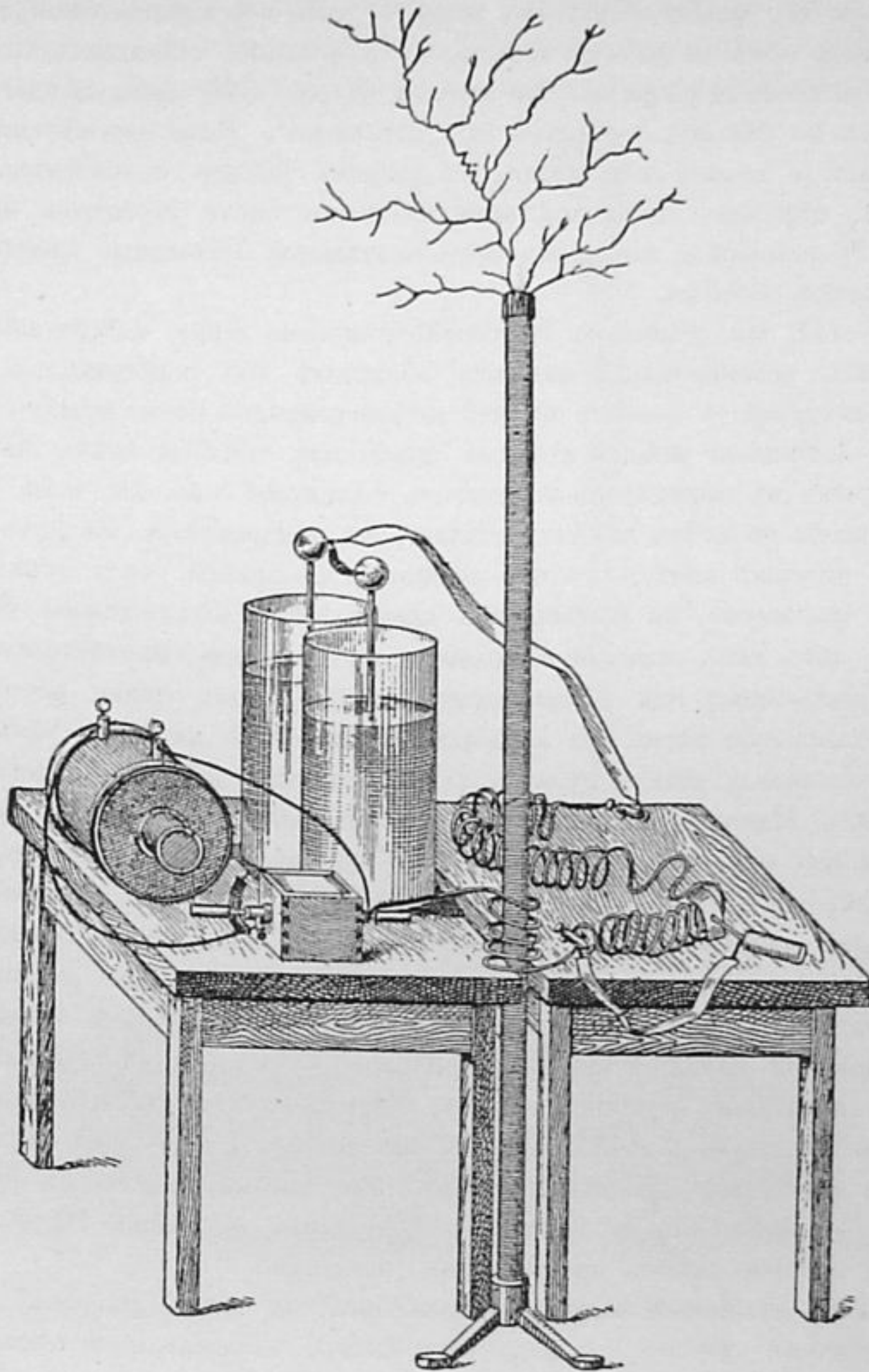


Рис. 320. Резонансовый трансформаторъ Тесла.

мыкатель первичной катушки перемѣщать въ то время, какъ искровой промежутокъ находится въ дѣйстви, то при опредѣленномъ поло-

женіи его можно видѣть въ темнотѣ, какъ изъ верхняго конца вторичной обмотки выходятъ въ воздухъ большіе, свѣтящіеся, сильно развѣтвленные разряды. Это явленіе на рис. 320 представлено чернымъ по бѣлому, т.-е. какъ бы „негативно“. Если перемѣстить замыкатель вправо или влево, то разрядъ быстро прекратится. Такимъ образомъ, лишь при определенномъ числѣ періодовъ возникаетъ резонансъ, которымъ обуславливаются громадныя напряжения у конца обмотки.

417. По сравненію съ рассмотрѣнными выше колебательными цѣпями резонирующая катушка обладаетъ той особенностью, что самоиндукція и емкость въ ней не разграничены рѣзко между собой. Въ настоящей конденсаторной цѣпи сила тока во всѣхъ частяхъ катушки въ определенный моментъ одинакова такъ же, какъ и напряжение во всѣхъ мѣстахъ діэлектрика конденсатора. Въ разомкнутой катушкѣ внизу, гдѣ она соединена съ землей, сила тока имѣетъ максимумъ, по направленію вверхъ токъ постепенно убываетъ, такъ какъ сильный боковой токъ смѣщенія, соотвѣтствующій возрастающему или убывающему электрическому полю, образуетъ параллельную вѣтвь. На изолированномъ концѣ катушки токъ, конечно, всегда равенъ нулю, и здѣсь, главнымъ образомъ, скопляется зарядъ. Напряжение проводника относительно земли имѣетъ максимальную величину наверху; по мѣрѣ перемѣщенія внизъ по катушкѣ зарядъ ея и напряжение ея поля слабѣютъ, а внизу у соединенія съ землею напряжение, конечно, все время безконечно мало. Распределеніе напряжения вдоль катушки можно очень хорошо продемонстрировать по способу Зейбта (Seibt), натягивая параллельно описанной вторичной катушкѣ тонкую проволоку, соединенную съ землею. Тогда разряды переходятъ на эту проволоку и образуютъ правильную свѣтовую полосу. Наверху эта полоса очень ярка, а книзу она постепенно становится все блѣднѣе, соотвѣтственно съ убываніемъ напряжения, и, наконецъ, совершенно исчезаетъ. На рис. 321 эта свѣтовая полоса представлена „негативно“.

Въ установкѣ опыта, изображенной на этомъ рисункѣ, связь вторичной катушки съ первичной цѣпью осуществлена нѣсколько иначе, нежели на рис. 320, а именно просто при помощи короткой соединительной проволоки, связывающей нижній конецъ вторичной катушки съ одной точкой первичной катушки. Такого рода связь посредствомъ прямого проводящаго соединенія часто называютъ гальва-

нической связью, тогда какъ связь, изображенную на рис. 320, называютъ индуктивной. Принципіально оба рода связи собственно ничѣмъ не различаются. Переменное электрическое напряженіе, воз-

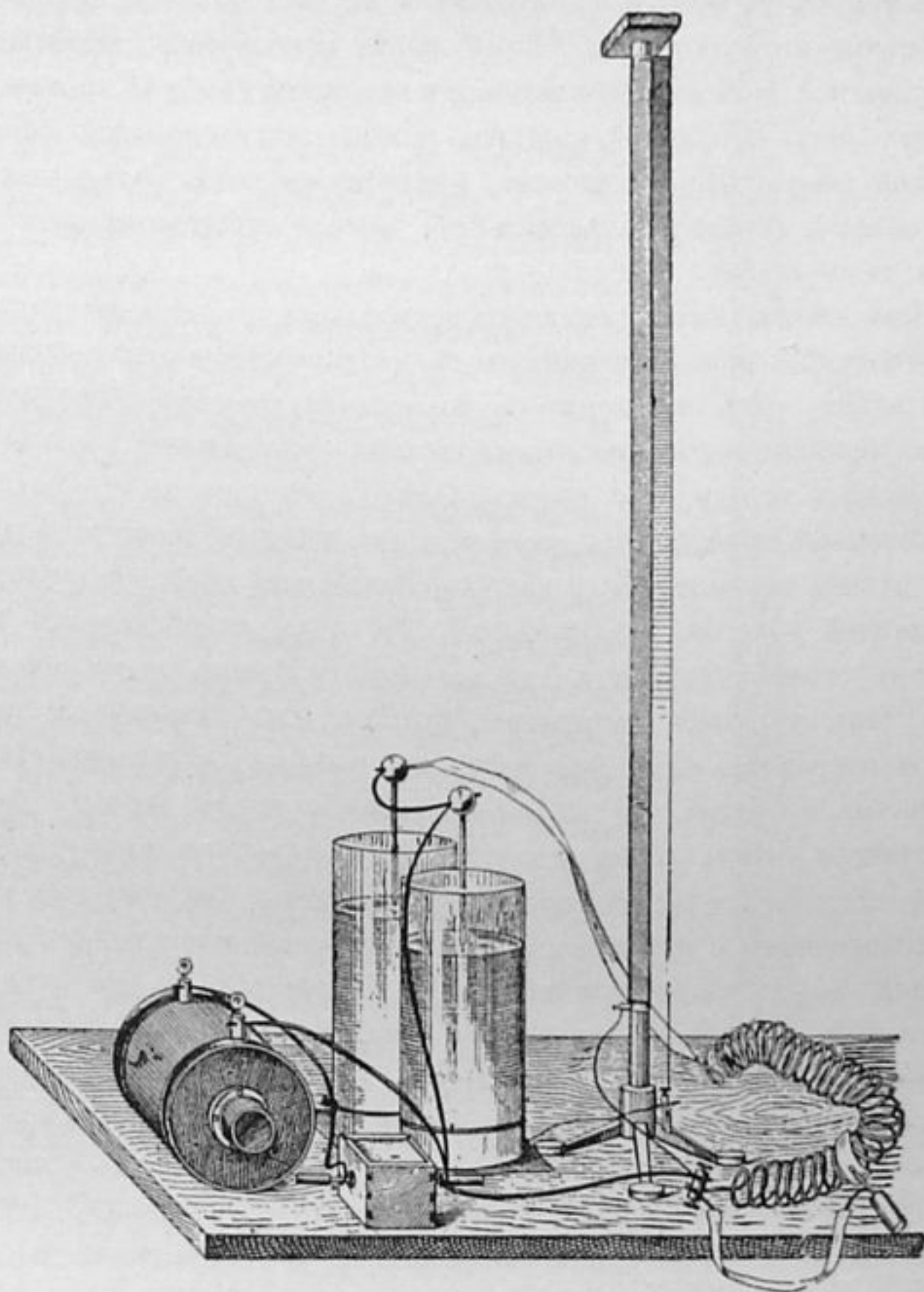


Рис. 321. Распредѣленіе напряженія вдоль резонирующей катушки, по Зейбту.

буждающее въ отвѣтвленіи гальванической связи переменный токъ, который затѣмъ продолжается во вторичной катушкѣ, представляетъ собою часть индуктивныхъ напряженій, вызываемыхъ измѣненіями первичнаго магнитнаго поля, потому что, какъ мы видѣли въ

§ 406, по сравненію съ ними могутъ быть оставлены безъ вниманія напряженія, соотвѣтствующія сопротивленію проводника. Тѣ же самыя индуктивныя напряженія дѣйствуютъ также на часть вторичной катушки и въ установкѣ, изображенной на рис. 320. Но при пользованіи индуктивной связью можно лучше использовать переменное электрическое поле первичной цѣпи и заставить его дѣйствовать на бѣольшую часть вторичной катушки, нежели при пользованіи гальванической связью. Иными словами, индуктивная связь легко можетъ быть сдѣлана гораздо болѣе сильной, нежели гальваническая связь, всегда лишь слабая.

Если электрическіе осцилляторы, имѣющіе раздѣльныя емкость и самоиндукцію, можно сравнивать съ механическими осцилляторами, въ которыхъ, какъ въ пружинѣ хронометра, пружинящая сила и инерція принадлежатъ различнымъ частямъ — спиральной пружинѣ и качающемуся колесу, — то спираль Зейбта мы можемъ сравнить съ колеблющимся воздушнымъ столбомъ, гдѣ нѣтъ возможности провести рѣзкое различіе между частью, обладающей инерціей, и частью, обладающей упругой податливостью. Но и въ колеблющемся воздушномъ столбѣ есть мѣста, гдѣ развивается преимущественно движеніе безъ упругихъ напряженій, и мѣста, гдѣ развиваются лишь упругія напряженія безъ движеній. Эти особыя мѣста называются пучностями и узлами. Въ закрытой органной трубѣ воздухъ внизу у амбушюра имѣетъ пучность, а у верхняго закрытаго конца — узелъ. Части, находящіяся между пучностью и узломъ, подвергаются какъ движеніямъ, такъ и напряженіямъ, и черезъ нихъ происходитъ перемѣщеніе энергіи попеременно отъ узла къ пучности и отъ пучности къ узлу. Если мы изъ двухъ состояній ээира будемъ магнитное состояніе считать аналогичнымъ съ движеніями, а электрическое — съ напряженіями, то мы должны будемъ нижній конецъ изображенной на рис. 321 катушки назвать пучностью, а верхній — узломъ. Ээирная полоса близъ катушки колеблется аналогично воздушному столбу въ закрытой органной трубѣ. Энергія будетъ попеременно магнитной около пучности и электрической около узла. Въ каждый періодъ она дважды перемѣщается въ ту и другую сторону.

418. Относительно колеблющихся воздушныхъ столбовъ мы знаемъ, что въ нихъ очень легко возникаютъ болѣе частыя, добавочныя колебанія, при чемъ они раздѣляются на равныя части. Напримѣръ, закрытая органная труба очень легко даетъ тонъ, число колебаній

котораго въ три раза больше числа колебаній основного тона. Въ такомъ случаѣ воздушный столбъ колеблется тремя частями; первая простирается отъ нижней пучности до $\frac{1}{3}$ высоты, гдѣ образуется узелъ, вторая — отъ этого узла до $\frac{2}{3}$ высоты, гдѣ находится пучность, третья — отъ этой пучности до закрытаго конца, гдѣ всегда находится узелъ. Продолжительность колебанія пропорціональна длинѣ колеблющейся части; въ силу этого простого правила въ приведенномъ примѣрѣ продолжительность колебанія равняется одной трети продолжительности основного колебанія.

Совершенно аналогичное явленіе представляютъ собой и электрическія колебанія въ эфирной полосѣ у катушки. Если уменьшать емкость первичной цѣпи, понижая также и самоиндукцію, до тѣхъ поръ, пока не будетъ достигнута треть начальной продолжительности колебанія, то вторичная катушка внезапно начинаетъ вновь резонировать, что обнаруживается по возникновенію искрящихся разрядовъ. При этомъ въ установкѣ Зейбта получается картина, представленная „негативно“ на рис. 322. Совершенно такъ же, какъ и въ органной трубѣ, мы здѣсь имѣемъ, кромѣ узла у верхняго конца катушки, еще одинъ узелъ на $\frac{1}{3}$ высоты, и, кромѣ пучности у нижняго конца катушки, образуется еще одна пучность на $\frac{2}{3}$ высоты. Легко получить на катушкѣ также пять и больше колеблющихся частей, если соотвѣтственнымъ образомъ понизить число колебаній первичной цѣпи.

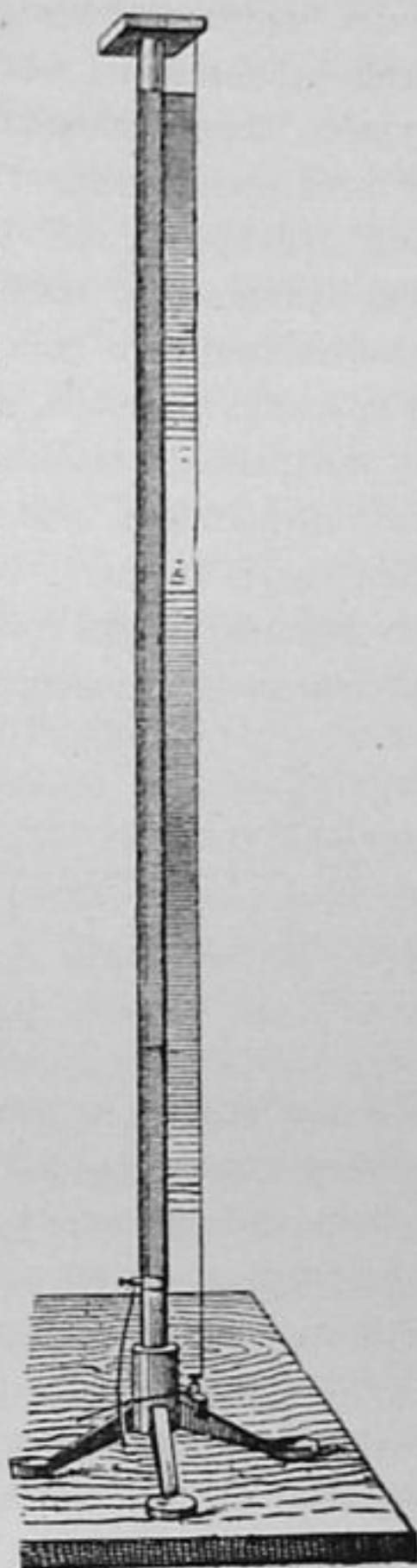


Рис. 322. Добавочныя колебанія катушки Зейбта

ОПЫТЫ ЛЕХЕРА.

419. Если посредством уменьшения емкости и самоиндукции сделать число периодов весьма высоким, то можно наблюдать явления резонанса на обыкновенных прямых проволоках, вместо катушек, какъ въ описанныхъ выше опытахъ. Такіе опыты впервые были произведены Г. Герцемъ, а затѣмъ въ лучшей установкѣ Лехеромъ (E. Lecher). Въ опытахъ Лехера пользуются двумя одинаковыми воздушными конденсаторами, включенными последовательно; эти конденсаторы состоятъ изъ четырехугольныхъ или круглыхъ пластинъ, которыя имѣютъ поверхность въ нѣсколько сотъ квадратныхъ сантиметровъ и находятся на разстояніи нѣсколькихъ сантиметровъ одна отъ другой; они имѣютъ, слѣдовательно, весьма малую емкость. Обѣ переднія пластины соединяются искровымъ промежуткомъ (рис. 323), а къ другой парѣ пластинъ присоединяются двѣ длинныя параллельныя проволоки, которыя между

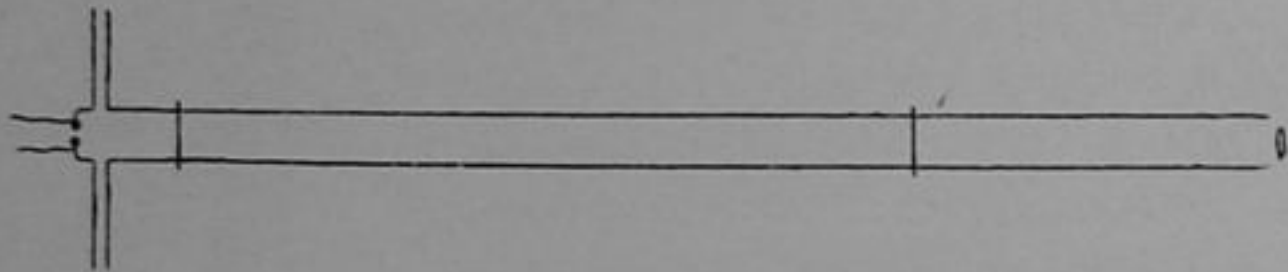


Рис. 323. Опытъ Лехера.

собой сообщаются мостомъ — поперечной проволокой. Образующееся такимъ образомъ проволочное соединеніе заднихъ пластинъ конденсаторовъ имѣетъ весьма малую самоиндукцію. Последняя измѣняется приблизительно пропорціонально длинѣ проволокъ; поэтому перемѣщеніемъ моста можно очень просто измѣнять самоиндукцію, а вмѣстѣ съ ней и число колебаній. При указанныхъ размѣрахъ конденсаторовъ получаются по формулѣ Томсона числа колебаній, близкія къ 10^8 (сто милліоновъ). Параллельныя проволоки за мостомъ гальванически связаны съ осцилляторомъ, и потому въ нихъ возбуждаются колебанія. Первичную цѣпь можно настроить такъ, чтобы проволочная цѣпь была съ ней въ резонансѣ. Для этой цѣли включаютъ между обоими концами параллельныхъ проволокъ гейслерову трубку и во время дѣйствія искрового промежутка передвигаютъ мостъ до тѣхъ поръ, пока трубка не вспыхнетъ очень ярко; тогда проволока находится въ резонансѣ съ осцилляторомъ. Если теперь передвигать гейслерову трубку вдоль параллельныхъ про-

волокъ и если послѣднія достаточно длинны, то можно обнаружить на нихъ еще рядъ узловъ на равныхъ разстояніяхъ одинъ отъ другого: въ этихъ мѣстахъ гейслерова трубка ярко вспыхиваетъ, такъ какъ въ узлахъ электрическое напряженіе имѣетъ максимальную величину. По срединѣ между каждой парой узловъ находится пучность, въ которой трубка остается темной и напряженіе равно нулю. Между узломъ и пучностью яркость разряда постепенно падаетъ, какъ и въ опытѣ Зейбта. Если разстояніе между параллельными проволоками очень мало въ сравненіи съ разстояніемъ между двумя узлами, то можно въ пучностяхъ соединять проволоки поперечными проволоками, не разстраивая резонанса; но если мостъ слегка лишь передвинуть изъ пучности, то разрядъ въ гейслеровой трубкѣ, указывающій на присутствіе колебаній, затухаетъ. Такимъ образомъ можно очень точно опредѣлить положенія пучностей и длину колеблющагося участка.

Столь же хорошій резонансъ получается, если коротко замкнуть концы параллельныхъ проволокъ при помощи толстой проволоки. На этомъ концѣ тогда получается пучность, а ближайшій узелъ, гдѣ гейслерова трубка вспыхиваетъ, лежитъ между концевымъ мостомъ и осцилляторомъ; число колебаній, при которомъ въ этомъ случаѣ получается резонансъ, конечно, иное, нежели при открытомъ концѣ. Параллельныя проволоки съ открытымъ концомъ можно уподобить закрытой трубѣ; проволоки съ короткозамкнутымъ концомъ можно уподобить открытой трубѣ. Въ закрытой трубѣ у закрытаго конца образуется узелъ, такъ какъ здѣсь невозможны колебанія воздуха въ ту и другую стороны; на концѣ же открытой трубы вслѣдствіе сообщенія съ внѣшней атмосферой не могутъ возникнуть колебанія давленія, и потому здѣсь образуется пучность. Аналогія съ электрическими колебаніями у параллельныхъ проволокъ очевидна.

420. вмѣсто того, чтобы связывать параллельныя проволоки съ осцилляторомъ гальванически, можно также воспользоваться индуктивной связью. Такимъ именно образомъ установка Лехера была видоизмѣнена Блондло (Blondlot). Возбудитель Блондло (рис. 324) состоитъ изъ двухъ согнутыхъ толстыхъ проволокъ, образующихъ вмѣстѣ окружность. Съ одной стороны концы этихъ проволокъ образуютъ небольшой искровой промежутокъ, а другіе два конца соединены съ двумя пластинами конденсатора. Если желательно полу-

чить очень быстрыя колебанія, то конденсаторныя пластины удаляютъ, такъ что остается лишь емкость свободныхъ концовъ проволокъ. Весь осцилляторъ чаще всего помещается въ керосинъ, гдѣ искры особенно сильны. Параллельно съ первой проволочной окружностью идетъ вторая проволочная цѣпь, которая съ одной стороны открыта и переходитъ въ двѣ параллельныя проволоки. Соединяя

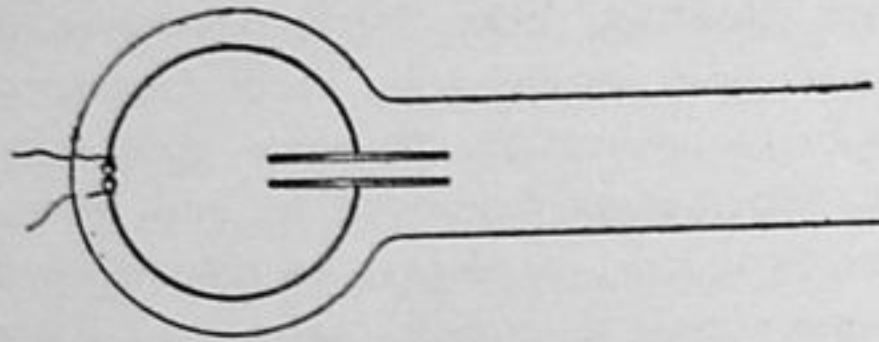


Рис. 324. Возбудитель Блондло.

надлежащимъ образомъ параллельныя проволоки поперечными мостами, легко получить участки, находящіеся въ резонансѣ съ осцилляторомъ. Конечно, число колебаній осциллятора Блондло нельзя измѣнять съ такимъ удобствомъ, какъ число колебаній осциллятора Лехера.

На установкахъ Лехера и Блондло легко уяснить себѣ разницу между гальванической и индуктивной связью. Если мостъ въ

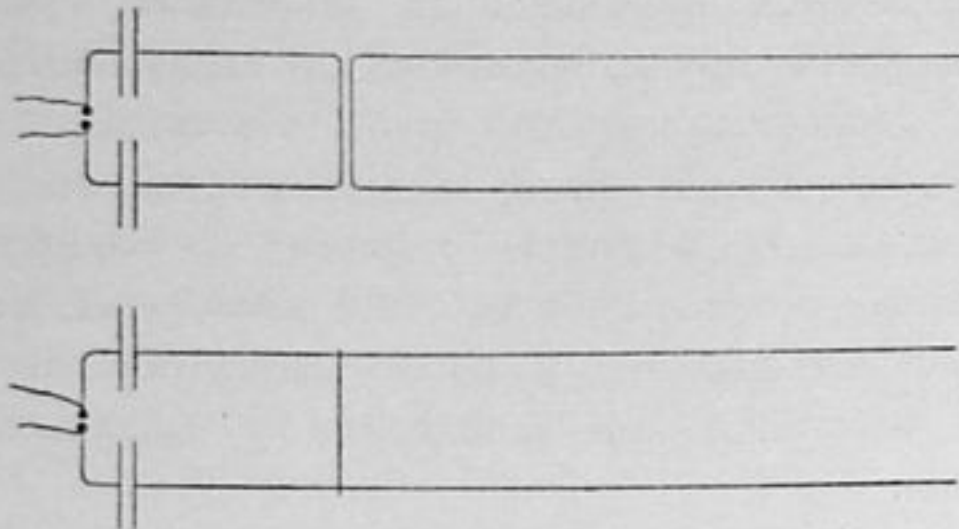


Рис. 325. Гальваническая и индуктивная связи, по существу тождественныя.

установкѣ Лехера замѣнимъ двумя очень близкими и изолированными одна отъ другой проволоками и между ними перерѣжемъ обѣ параллельныя проволоки, то получимъ индуктивную связь, по существу совершенно тождественную съ гальванической (рис. 325). Если же послѣ раздѣленія перемѣстить осцилляторъ такъ, чтобы полоса между параллельными проволоками была, какъ въ установкѣ Блондло,

частью покрыта поверхностью, ограниченной цепью осциллятора, то связь, конечно, станет гораздо болѣе сильной, такъ какъ болѣе большая часть магнитныхъ силовыхъ линий осциллятора пересѣкаетъ при этомъ поверхность вторичной цепи, тогда какъ въ установкѣ рис. 325 обѣ проводки связываются относительно малымъ числомъ общихъ силовыхъ линий. Такимъ образомъ, установка Blondlo существенно отличается отъ установки Лехера лишь болѣе сильной связью, обуславливающей болѣе быстрый переходъ энергіи колебаній изъ осциллятора во вторичную цепь. Впрочемъ, путемъ измененія разстоянія между двумя цепями индуктивная связь очень легко можетъ быть сдѣлана болѣе сильной или болѣе слабой, смотря по требованіямъ опыта.

421. Какъ и въ спирали Зейбта, можно на короткихъ колебаніяхъ опытовъ Лехера сдѣлать видимымъ распределеніе напряженія, пользуясь явлениями разряда между параллельными проволоками. Для этой цѣли нужно получить колебанія съ весьма высокими напряжениями. Лучше всего возбуждать искру осциллятора, погруженнаго въ керосинъ, при помощи высокихъ напряженій вторичной обмотки трансформатора Тесла, какъ показываетъ рис. 326. Параллельныя проволоки ограничены мостомъ изъ толстой проволоки, при

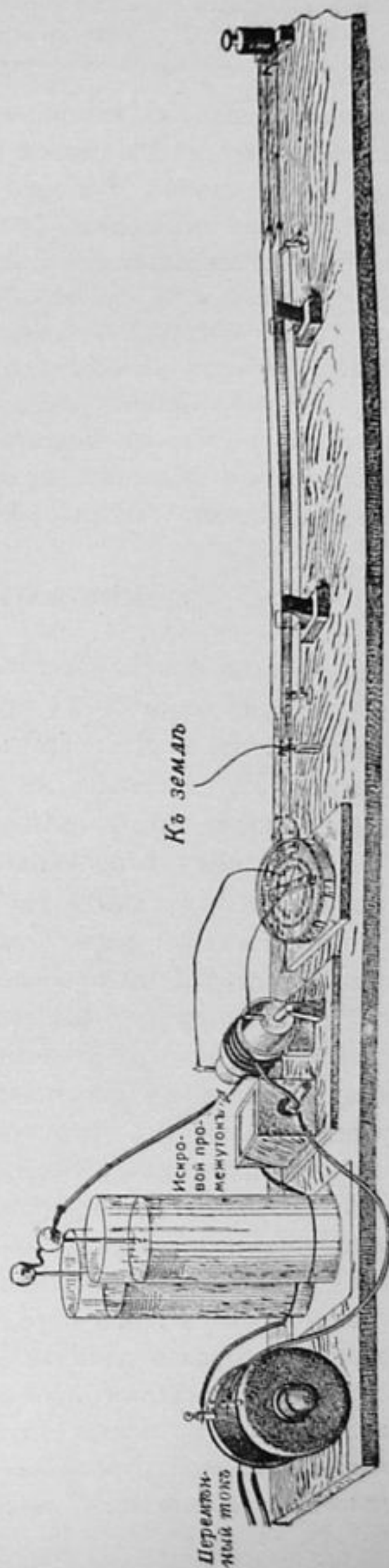


Рис. 326. Демонстрація короткихъ электрическихъ колебаній съ помощью трубки Аронса.

помощи котораго ихъ можно очень удобно настроить на колебанія осциллятора. На мѣстѣ первой пучности помѣщается мостъ, соединенный посредствомъ толстаго провода съ землею, чтобы такимъ путемъ удалить колебанія Тесла отъ параллельныхъ проволокъ. Если обѣ параллельныя проволоки тонки и достаточно близки между собой, то, какъ и въ опытѣ Зейбта, между ними видны широкія полосы свѣта, которыя отличаются особенной яркостью въ узлахъ и отсутствуютъ въ пучностяхъ. Легче это явленіе получается по способу Аронса (Arons), если помѣстить параллельныя проволоки въ широкой и длинной стеклянной трубкѣ, которую разрѣзаютъ настолько, чтобы облегчить возникновеніе разрядовъ. Явленіе представлено „негативно“ на рис. 326.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЯ ВОЛНЫ.

422. Если держать камертонъ около отверстія широкой стеклянной трубки, закрытой съ противоположнаго конца подвижнымъ поршнемъ, который установленъ такъ, что воздушный столбъ въ трубѣ находится какъ разъ въ резонансѣ съ камертономъ, то въ этомъ воздушномъ столбѣ возникаетъ правильное колебаніе съ узлами и пучностями, которое продолжается все время, пока звучитъ камертонъ. Въ этомъ опытѣ мы имѣемъ точную механическую аналогію опыта Лехера: первичному осциллятору соотвѣтствуетъ камертонъ, параллельнымъ проволокамъ — стеклянная труба, а эфирной полосѣ, поле которой ограничено параллельными проволоками, — воздушный столбъ, ограниченный стеклянной трубкой. Иныя явленія наблюдаются, если въ акустическомъ опытѣ замѣнить стеклянную трубу весьма длиннымъ трубопроводомъ. Колебанія воздуха, вызываемыя звучащимъ камертономъ, возбуждаютъ въ началѣ трубопровода колебанія, распространяющіяся въ немъ въ видѣ поступательно движущагося ряда волнъ. Такъ какъ камертонъ звучитъ лишь въ теченіе опредѣленнаго промежутка времени, то и этотъ рядъ волнъ имѣетъ лишь опредѣленную длину. Мы примемъ, что трубопроводъ гораздо длиннѣе этого ряда волнъ; въ такомъ случаѣ требуется замѣтный промежутокъ времени для того, чтобы эти волны достигли конца трубы. Если труба закрыта, то волны испытываютъ полное отраженіе и двигаются обратно съ тою же скоростью, съ какою онѣ двигались впередъ. Подобное же явле-

ніе происходит и въ томъ случаѣ, когда труба открыта, но при этомъ отщепляется малая часть энергіи волнъ и выходитъ во виѣшнее пространство въ видѣ слабой шаровой волны; остальная же несравненно бѣльшая часть энергіи отражается и остается въ трубѣ. Въ обоихъ случаяхъ крайняя часть трубы въ теченіе нѣкотораго промежутка времени заполняется волнами, идущими въ ту и другую стороны; оба ряда волнъ имѣютъ почти одинаковую интенсивность и взаимно налагаются. Такъ какъ переносъ энергіи, совершаемый однимъ рядомъ волнъ, компенсируется переносомъ энергіи, совершаемымъ другимъ рядомъ, то въ дѣйствительности не происходитъ переноса энергіи ни въ ту, ни въ другую сторону; все это явленіе называютъ стоячей волной. Стоячая волна имѣетъ такой же видъ, какъ и колебаніе въ короткой трубѣ; подобно ему она состоитъ изъ определенныхъ участковъ, ограничиваемыхъ узлами и пучностями. Дѣйствительно, возникновеніе колебаній въ короткой трубѣ можно представлять себѣ такимъ образомъ: волна, вступающая въ отверстіе трубы, отражается отъ конца трубы обратно; отброшенная волна у начала трубы вновь отражается и т. д. Вслѣдствіе наложенія большого числа волнъ, идущихъ въ ту и другую сторону, въ трубѣ известной длины получается стоячая волна, такъ какъ ни одно изъ двухъ направленій распространенія не преобладаетъ надъ другимъ. Разница между процессами протекающими въ длинной и короткой трубахъ, заключается, слѣдовательно, въ томъ, что вторую всю занимаетъ стоячая волна, а въ первой стоячая волна занимаетъ лишь относительно малую часть, которая, однако, можетъ быть гораздо длиннѣе короткой трубы.

Совершенно аналогичныя явленія мы получимъ, присоединяя къ осциллятору Лехера параллельныя проволоки длиною въ нѣсколько километровъ. Мы замѣтимъ узлы и пучности лишь въ послѣднемъ участкѣ проводовъ. Въ остальной проводкѣ можно, правда, обнаружить переменныя электрическія напряженія по индукціоннымъ дѣйствіямъ или даже по явленіямъ резонанса въ небольшихъ настраиваемыхъ цѣпяхъ, помѣщенныхъ вблизи проводки, но узловъ и пучностей здѣсь не получается. Въ этихъ частяхъ проводки мы имѣемъ ряды электрическихъ волнъ, послѣдовательно движущіеся въ ту и другую стороны. Здѣсь передъ нами совершенно новое явленіе — распространяющаяся электрическая волна, — природу котораго мы ниже изучимъ подробнѣе.

423. Чтобы понять, какимъ образомъ электрическія волны могутъ распространяться черезъ эфиръ, намъ полезно будетъ руководствоваться механическимъ образомъ воздушныхъ волнъ, который непосредственно является для насъ болѣе нагляднымъ. Представимъ себѣ весьма длинную наполненную воздухомъ трубку, въ которую съ одного конца короткимъ ударомъ немного вдвигаютъ поршень. Сначала непосредственно у поршня образуется небольшое сгущеніе, которое сейчасъ же передается къ слѣдующимъ частямъ воздушнаго столба, тогда какъ у поршня вновь возстанавливается нормальная плотность воздуха; толчокъ и сгущеніе передаются, такимъ образомъ, вдоль всей трубы. Отдѣльные моменты этого явленія можно видѣть на рис. 327. Здѣсь штриховкой представлено сгущеніе, только-что достигшее части AE . Паденіе давленія съ передней стороны A

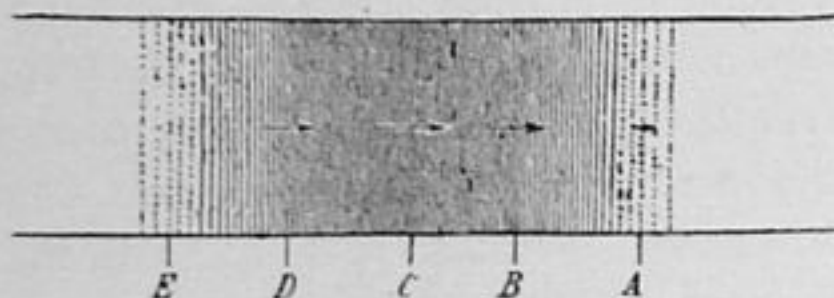


Рис. 327. Распространеніе волны сгущенія въ воздушномъ столбѣ.

сгущенія вызываетъ движеніе частицъ воздуха, до этого момента находившихся въ покоѣ, въ направленіи маленькой стрѣлки. Все время, пока происходитъ паденіе давленія, скорость этого движенія возрастаетъ все болѣе и болѣе. Поэтому частицы, находящіяся въ B , нѣсколько дальше внутри сгущенія, движутся скорѣе, такъ какъ здѣсь паденіе давленія дѣйствуетъ уже съ того момента, когда передняя поверхность волны прошла черезъ B . Максимумъ скорости находится въ C , гдѣ находится также и максимумъ сгущенія. Дѣйствительно, по другую сторону этого максимума сгущенія, въ D , съ того момента, когда максимумъ прошелъ чрезъ D , имѣло мѣсто отрицательное паденіе давленія, вслѣдствіе чего движеніе здѣсь замедлялось. Поэтому въ D скорость меньше, нежели въ C , и при томъ тѣмъ меньше, чѣмъ ближе точка D находится къ тылу сгущенія E . Въ точкахъ же сзади отъ E , черезъ которыя волна сгущенія уже прошла совершенно, движеніе прекратилось. Такимъ образомъ, всѣ воздушныя частицы въ области EA послѣдовательно начинаютъ и заканчиваютъ краткое поступательное движеніе; послѣднее и является причиной распространенія сгущенія, вмѣстѣ съ которымъ одно-

временно происходит вышеописаннымъ образомъ также и распространение движенія, которымъ вызывается сгущение. Изъ этой теоріи слѣдуетъ, что скорость передачи толчка зависитъ отъ двухъ свойствъ газа. Во-первыхъ, чѣмъ тяжелѣе среда, тѣмъ медленнѣе движенія, вызываемыя определеннымъ паденіемъ давленія, и тѣмъ медленнѣе также сгущение передается впередъ. Во-вторыхъ, чѣмъ податливѣе среда, тѣмъ меньше будутъ силы давленія, возникающія при определенномъ сгущеніи, и тѣмъ медленнѣе вызываемыя имъ движенія, тѣмъ медленнѣе поэтому передается сгущение. Если удѣльная плотность среды равняется s , коэффициентъ упругости, или сжимаемость, т.-е. отношеніе сжатія къ связанному съ нимъ измѣненію давленія, равняется γ , то скорость распространения волны сжатія c или, что то же, скорость распространения энергии тѣмъ меньше, чѣмъ больше произведеніе $s \cdot \gamma$. Болѣе точное математическое вычисленіе даетъ формулу

$$c = \frac{1}{\sqrt{s \cdot \gamma}}$$

Если плотность s выражена въ граммахъ на кубической сантиметръ, а давленіе въ выраженіи сжимаемости дано въ динахъ на квадратный сантиметръ, то формула даетъ количество c въ $\frac{\text{см.}}{\text{сек.}}$. Съ такой же самой скоростью распространяется, конечно, и правильная смѣна сгущеній и разрѣженій, т.-е. рядъ волнъ. Для воздуха при 0°C . по этой формулѣ получается скорость $33\,100 \frac{\text{см.}}{\text{сек.}}$; такую же величину даютъ и измѣренія.

Тѣмъ же способомъ можно развить и теорію распространения энергии въ эфирѣ. Представимъ себѣ, что въ началѣ длинной проводки, состоящей изъ двухъ параллельныхъ проволокъ, какимъ-либо образомъ вызвано кратковременное электрическое напряженіе между обѣими проволоками. Въ первый моментъ электрическое поле будетъ находиться лишь въ началѣ проводки, но сейчасъ же оно перенесется въ сосѣднюю часть проводки и въ то же время исчезнетъ изъ перваго мѣста; такимъ образомъ поле будетъ перемѣщаться далѣе по всей проводкѣ. На рис. 328 представленъ моментъ, когда импульсъ напряженія дошелъ до мѣста AE проводки. На фронтѣ волны A имѣетъ мѣсто убыль напряженія, и потому условіе равновѣсія электрическаго поля здѣсь нарушено. Напримѣръ, если напряженіе вдоль

AA' меньше, чѣмъ вдоль BB' , то вся линейная сумма поля вдоль $AA' B' BA$ отлична отъ нуля. Отсюда слѣдуетъ, что эфирныя напряжения на фронтѣ волны вызываютъ магнитное поле, которое возрастаетъ тѣмъ болѣе, чѣмъ дольше продолжаются возбужденныя напряжения. Такимъ образомъ, магнитное поле въ области B , лежащей уже дальше внутри волны, сильнѣе, нежели на фронтѣ, такъ какъ тамъ напряжения дѣйствовали все время въ одномъ и томъ же направленіи съ момента, когда фронтъ волны прошелъ черезъ B . Магнитное поле достигаетъ максимума въ тотъ же моментъ, какъ и электрическое напряженіе, а именно въ C на рис. 328. Дѣйствительно, по другую сторону максимума электрическаго поля, въ области D , электрическое поле дѣйствовало въ обратномъ направле-

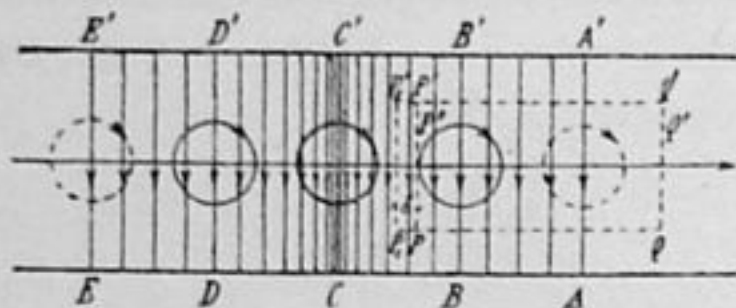


Рис 328. Распространеніе электрическаго толчка напряженія въ полость эѳира, ограниченной двумя параллельными проволоками.

ніи съ того момента, когда максимумъ прошелъ черезъ D , такъ какъ напряженіе вдоль DD' меньше, нежели вдоль CC' , и линейная сумма вдоль $CC' D' DC$ имѣетъ потому знакъ, противоположный тому, который имѣетъ сумма вдоль $BB' C' CB$. Въ области D электрическое поле постепенно уменьшаетъ поэтому магнитное поле, которое, наконецъ, въ тылу E импульса напряженія равняется нулю. Линіи описаннаго магнитнаго поля перпендикулярны къ электрическимъ силовымъ линіямъ и на рис. 328 представлены въ сѣченіи, какъ линіи ротора, посредствомъ кружковъ со стрѣлками. Дѣйствіемъ этого магнитнаго поля все электрическое поле перемѣщается въ эѳиръ впередъ, какъ легко понять изъ того, что изложено нами въ §§ 250 и 251. Но волна импульса напряженія, распространяясь подъ дѣйствіемъ вызываемаго ею магнитнаго поля вдоль проволокъ, увлекаетъ съ собою магнитное поле; поэтому распространеніе энергіи въ эѳиръ вполнѣ аналогично распространенію энергіи въ упругой матеріальной средѣ. Подобно тому, какъ скорость распространенія энергіи въ матеріальной средѣ зависитъ отъ плотности и упругости

среды, такъ въ эфирѣ она опредѣляется соответственными величинами проницаемости и діэлектрической постоянной и вычисляется по той же формулѣ, приведенной нами выше.

424. Эту формулу не трудно, впрочемъ, вывести, и мы докажемъ ее вкратцѣ. Пусть c будетъ скорость распространения волны, E — сила поля въ некоторомъ мѣстѣ PP' (рис. 328) и B — магнитная индукція въ этомъ мѣстѣ. Положимъ далѣе, что QQ' есть линия передъ фронтомъ волны, куда импульсъ, слѣдовательно, еще не пришелъ. Обозначимъ черезъ τ тотъ безконечно малый промежутокъ времени, въ теченіе котораго импульсъ перемѣщается на безконечно малый отрѣзокъ $\delta = P_1P$ такъ что $\delta = c \cdot \tau$. Въ теченіе малаго промежутка времени τ магнитный силовой потокъ, пронизывающій узкую полосу $PP'P_1P_1'$, вступаетъ въ четырехугольникъ $QQ'P'R$. Если длину PP' обозначимъ черезъ a , то полное приращеніе магнитныхъ силовыхъ линий, получаемое четырехугольникомъ $QQ'P'R$ за безконечно малый промежутокъ времени τ , равняется $B \cdot a \cdot \delta = B \cdot a \cdot c \cdot \tau$; слѣдовательно, скорость, съ которой возрастаетъ въ это время полный силовой потокъ, пронизывающій четырехугольникъ, равняется $B \cdot a \cdot c$. По второму закону Максвелла эта скорость возрастанія магнитнаго поля должна равняться линейной суммѣ электрическаго поля вдоль границы четырехугольника. Такъ какъ только вдоль стороны PP' имѣется слагающая E , отличная отъ нуля, то линейная сумма равняется $E \cdot a$, и мы имѣемъ поэтому:

$$E \cdot a = B \cdot a \cdot c ; \text{ слѣдовательно, } E = B \cdot c.$$

Электрическое напряженіе вдоль некоторой линіи равняется числу магнитныхъ силовыхъ линий, проходящихъ черезъ нее въ теченіе секунды.

Первый законъ Максвелла также даетъ некоторое соотношеніе между электрическимъ полемъ и магнитнымъ. Чтобы убѣдиться въ этомъ, рассмотримъ прямоугольникъ, двѣ стороны котораго пересѣкаютъ перпендикулярно плоскость рисунка, т.-е. направлены параллельно магнитнымъ силовымъ линіямъ. Положимъ, что длина этихъ сторонъ равна b , и что онѣ проходятъ черезъ точки P'' и Q'' прямыхъ PP' и QQ' . Назовемъ черезъ D электрическое возбужденіе и черезъ H силу магнитнаго поля въ мѣстѣ P'' . Скорость, съ которою возрастаетъ пронизывающее прямоугольникъ электрическое возбужденіе, т.-е. проходящій черезъ прямоугольникъ электрическій токъ

ОСЦИЛЛЯТОРЪ ГЕРЦА.

428. Для возбужденія свободныхъ электромагнитныхъ волнъ Герць пользовался приборомъ, который изображенъ на рис. 336. Онъ состоитъ изъ двухъ толстыхъ стержней — отръзковъ латуныхъ трубокъ, которые оканчиваются шаровыми поверхностями и вмѣстѣ образуютъ искровой промежутокъ. Провода отъ индуктора подходятъ возможно ближе къ искрѣ. Такой стержневой осцилляторъ представляетъ собою колебательную цѣпь съ весьма малой емкостью. Она образуется обоими наружными концами стержней, которые во время колебаній заряжаются попеременно: то верхній положительно и нижній отрицательно, то наоборотъ. Вслѣдствіе большого разстоянія между концами стержней емкость, конечно, чрезвычайно мала.

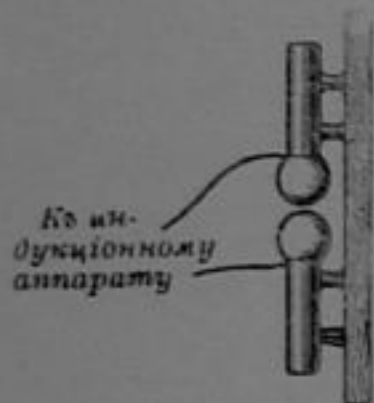


Рис. 336. Осцилляторъ Герца.

Средняя часть осциллятора Герца съ искровымъ промежутокъ образуетъ цѣпь замыканія этой емкости; вокругъ нея обвиваются магнитныя силовыя линіи. Этотъ осцилляторъ отличается чрезвычайно малымъ коэффициентомъ самоиндукціи. Благодаря этому, при помощи такого осциллятора получаютъ чрезвычайно быстрыя колебанія. Такъ какъ у концовъ стержней лежатъ узлы, а искра приходится въ пучности, то вся длина l осцил-

лятора приблизительно равняется половинѣ длины волны колебанія, т.-е. $l = \frac{\lambda}{2}$. Поэтому число періодовъ въ секунду равняется $n = \frac{3 \cdot 10^{10}}{2l}$.

Осцилляторъ, которымъ пользовался Герць, имѣлъ въ длину 26 см., длина волны его колебанія была равна приблизительно 60 см., число періодовъ было $5 \cdot 10^8$.

Существенное отличіе такого осциллятора отъ осциллятора съ плоскимъ конденсаторомъ и цѣпью замыканія заключается въ томъ, что его электрическое поле охватываетъ большое пространство, почему онъ самъ излучаетъ: онъ является одновременно осцилляторомъ и антенной.

Осцилляторы съ весьма обширными электрическими полями называются открытыми. Тѣ осцилляторы, электрическія поля которыхъ въ моментъ исчезновенія тока ограничены узкимъ пространствомъ діэлектрика конден-

сатора, называются закрытыми. Открытые осцилляторы излучаютъ сильно, закрытые же почти не излучаютъ.

Такъ какъ осцилляторъ Герца одновременно играетъ также роль антенны, то опыты съ нимъ очень просты. Но онъ обладаетъ тѣмъ свойствомъ, что его колебанія очень сильно затухаютъ вслѣдствіе большого излученія энергіи. Поэтому, если желательно работать со слабо затухающими свободными волнами, то нужно пользоваться болѣе сложной установкой, описанной въ § 427. Существуетъ возможность строить закрытыя конденсаторныя цѣпи для весьма короткихъ волнъ.

ПРИЕМНИКИ ДЛЯ СВОБОДНЫХЪ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХЪ ВОЛНЪ.

429. Чтобы обнаружить электромагнитныя волны въ пространствѣ, пользуются со времени Герца металлическимъ стержнемъ — приемной антенной, въ которую, вмѣсто искрового промежутка, включенъ аппаратъ, обнаруживающій волны — детекторъ. Простѣйшимъ детекторомъ можетъ служить очень малый искровой промежутокъ; исключительно такимъ детекторомъ пользовался Герцъ. На рис. 337 представленъ приемникъ Герца; искровой промежутокъ состоялъ въ немъ изъ шара и острія, которое при помощи микрометрическаго винта можно было очень близко подвести къ шару.

Чтобы демонстрировать волны, нужно имѣть возможность обнаружить появленіе искорки посредствомъ какого-нибудь видимаго издалека дѣйствія. Для этой цѣли изобрѣтены многочисленныя методы; простѣйшій основанъ на примѣненіи когерера Бранли (Branly). Этотъ приборъ представляетъ собою короткую замкнутую стеклянную трубку, въ которую съ обѣихъ сторонъ введены металлическіе провода; къ послѣднимъ внутри прикрѣплены электроды съ нѣскольکو большей поверхностью. Трубка наполнена рыхлымъ и грубымъ металлическимъ порошкомъ, — на примѣръ, мелкими желѣзными стружками. Такой порошокъ обычно является весьма дурнымъ проводникомъ; но когда черезъ него проходитъ электрической разрядъ, изъ зеренъ составляются какимъ-то въ точности неизвѣстнымъ образомъ проводящія нити, и порошокъ внезапно становится очень хорошимъ проводни-

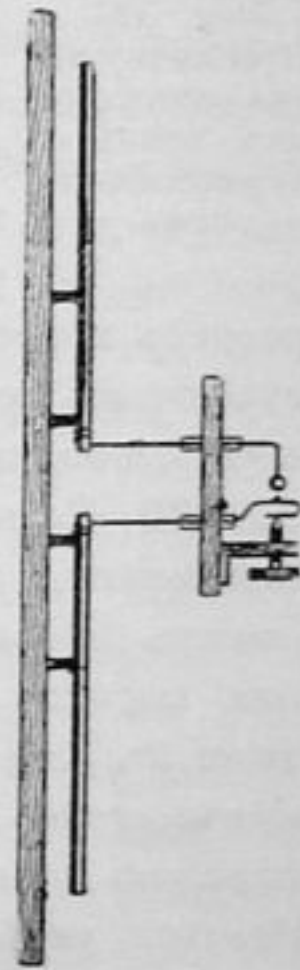


Рис. 337.
Приемникъ Герца.

комъ. Это внезапное сильное изменение электропроводности можетъ быть продемонстрировано различными способами. На рис. 344 видно, какъ когереръ включенъ въ приемную антенну; кромѣ того, черезъ когереръ замкнута цѣпь, содержащая небольшой гальванической элементъ и звонокъ. Когда волны падаютъ на антенну и въ когерерѣ проскакиваютъ маленькія искорки, онъ становится проводящимъ, и звонокъ начинаетъ дѣйствовать. Когереръ обладаетъ тѣмъ свойствомъ, что сдѣлавшись разъ хорошимъ проводникомъ, онъ самъ по себѣ не теряетъ проводимости. Чтобы сдѣлать его вновь дурнымъ проводникомъ, т.-е. пригоднымъ къ употребленію въ качествѣ детектора, нужно сначала постукиваніемъ разрушить образовавшіяся небольшія проводящія нити.



Къ
гальванометру

Рис. 338.
Приемная антенна для короткихъ волнъ съ термоэлементомъ.

Въ опытѣ, представленномъ на рис. 344, это происходитъ просто вслѣдствіе сотрясенія прибора при дѣйствіи находящагося вблизи звонка. Но обыкновенно пользуются особымъ молоточкомъ, построеннымъ по принципу молотка Вагнера, въ видѣ звонка, язычокъ котораго ударяетъ по трубочкѣ съ металлическимъ порошкомъ въ теченіи всего времени, пока когереръ хорошо проводитъ. Благодаря этому приспособленію, когереръ очень скоро послѣ прекращенія волнъ опять становится дурнымъ проводникомъ.

430. Если желаютъ производить измѣренія надъ электрическими колебаніями, то лучше всего пользоваться термоэлементами изъ тонкихъ проволокъ, нагрѣваемыхъ подъ дѣйствіемъ переменнаго тока высокой частоты. Термоэлементы можно, конечно, включать также въ качествѣ детекторовъ въ приемныя антенны для свободныхъ волнъ; такіе детекторы не только оказываются очень чувствительными, но позволяютъ также измѣрять интенсивность волнъ. Термоэлементъ удобнѣе всего дѣлать изъ желѣзной и константановой проволоки, имѣющихъ толщину волоса (рис. 338); онѣ припаяны однимъ концомъ къ антеннѣ и посрединѣ перевиты одна вокругъ другой въ видѣ креста. Оба свободные конца этихъ проволокъ припаяны къ проводамъ очень чувствительнаго гальванометра. Особенной чувствительности можно достигнуть, помѣщая термоэлементъ въ очень хорошо эвакуированный стеклянный сосудъ*). При данномъ

*) Это было открыто П. Н. Лебедевымъ.

количество энергии термоэлементъ нагревается гораздо сильнее, если теплота не уходитъ черезъ окружающій воздухъ. Чтобы настроить антенну на изслѣдуемое колебаніе, полезно не включать термоэлементъ въ металлическій стержень, какъ изображено на рис. 338, но дѣлать антенну изъ цѣльнаго стержня, длина котораго равна половинѣ длины волны, а термоэлементъ привключить въ видѣ отвлѣченія къ пучности. Чѣмъ меньше сопротивленіе стержня, тѣмъ лучше онъ резонируетъ, и напряжения при этомъ возрастаютъ настолько, что параллельно включенное сопротивление сильно нагревается, какъ въ опытѣ, представленномъ на рис. 309.

ОПЫТЫ СЪ ВОЛНАМИ ГЕРЦА.

431. Металлы отражаютъ электромагнитныя волны. Если параллельныя проволоки замкнуть очень толстымъ металлическимъ мостомъ, то волны, идущія вдоль проволокъ, будутъ отражаться отъ него почти полностью. Точно такъ же металлическая пластинка отражаетъ падающія на нее свободныя волны. Если между осцилляторомъ и приемникомъ установить большую металлическую пластину, то волны вовсе не дойдутъ до приемника, такъ какъ металлическая пластина ихъ не пропуститъ. Но если на нѣкоторомъ разстояніи сбоку помѣстить второй металлическій экранъ такимъ образомъ, чтобы лучъ, идущій отъ осциллятора, могъ, по закону отраженія, попасть въ приемникъ, минуя металлическія преграды, то детекторъ обнаруживаетъ излученіе. Мы видимъ, такимъ образомъ, что металлическая пластина совершенно не пропускаетъ черезъ себя излученія, но сильно его отражаетъ. При этомъ часть излученія поглощается металломъ вслѣдствіе омическаго сопротивленія. Можно производить эти опыты съ очень тонкими металлическими листками; оказывается, что отраженіе и сопровождающее его поглощеніе въ случаѣ быстрыхъ колебаній обнаруживаются во всей полнотѣ уже при чрезвычайно тонкихъ металлических слояхъ, съ поперечникомъ въ нѣсколько сотыхъ миллиметра.

Благодаря этому отражающему дѣйствию металловъ, волны удерживаются между двумя проволоками параллельной проводки подобно тому, какъ звукъ удерживается внутри трубы, благодаря ея отражающимъ твердымъ стѣнкамъ. Мы видѣли уже въ § 408, что быстрыя колебанія при этомъ очень мало проникаютъ въ металлъ. Медленныя волны проникаютъ глубже, но и онѣ отражаются; мы видѣли, на примѣръ, въ § 370, что металлическій цилиндръ можетъ

частью ограждать свое внутреннее пространство отъ весьма медленнаго переменнаго поля съ числомъ періодовъ, равнымъ пятидесяти, т.-е. можетъ отражать это поле.

432. Металлическимъ отраженіемъ пользуются для построения вогнутыхъ зеркалъ, чтобы при опытахъ со свободными волнами лучше концентрировать ихъ энергію. Обычно пользуются, какъ это дѣлалъ уже Герцъ, цилиндрическимъ зеркаломъ съ параболическимъ поперечнымъ сѣченіемъ. Осцилляторъ помѣщаютъ вдоль фокальной линіи параболическаго цилиндра, изъ котораго излученіе исходитъ тогда, какъ отъ прожектора. Приемникъ помѣщаютъ вдоль фокальной линіи втораго параболическаго цилиндра. Если пучокъ лучей, исходящій отъ

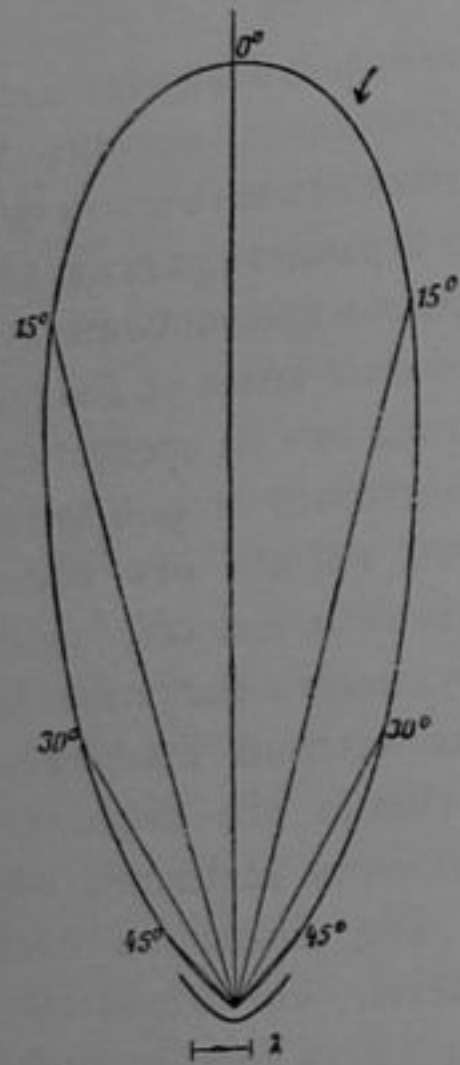


Рис. 339. Диффракція волнъ Герца, идущихъ отъ цилиндрическаго вогнутаго зеркала.

Длина радіуса-вектора даетъ интенсивность излученія въ данномъ направленіи. Длина волны излученія $\lambda = 40$ см.

Отверстіе зеркала 54 см.

„прожектора“, перехватить вогнутымъ зеркаломъ приемника, то лучи концентрируются на его фокальной линіи, т.-е. на приемной антеннѣ, и въ детекторѣ получаютъ сильныя дѣйствія. Еще лучше было бы давать вогнутымъ зеркаламъ форму параболоида вращенія (какъ это дѣлается при устройствѣ свѣтовыхъ прожекторовъ), такъ какъ цилиндрическія зеркала отчасти разсѣиваютъ лучи вверхъ и внизъ, вслѣдствіе чего концентрація лучей оказывается несовершенной. Однако, по большей части, довольствуются цилиндрическими зеркалами, такъ какъ ихъ весьма легко изготовлять. Кромѣ того, въ нихъ происходитъ еще довольно сильное разсѣиваніе лучей въ экваторіальныхъ направленіяхъ, такъ какъ законъ отраженія, изъ котораго мы исходили при построеніи вогнутаго зеркала, справедливъ лишь въ томъ случаѣ, когда размѣры зеркала безконечно велики сравнительно съ длиной волны излученія. Если же это условіе не удовлетворено, то происходитъ, какъ извѣстно изъ ученія о волно-

образномъ движеніи, сильное разсѣянiе лучей, называемое диффракціей. При длинныхъ электромагнитныхъ волнахъ всегда наблюдаются довольно сильныя явленія диффракціи. На рис. 339 графически

представлена для одного опредѣленнаго случая зависимость напряженности излученія, идущаго отъ цилиндрическаго вогнутаго зеркала, отъ направленія. Длина радиуса, проведеннаго въ опредѣленномъ направленіи, представляетъ соотвѣтственную напряженность. Кривая получена при помощи пріемника съ термоэлементомъ. Длина волны излученія была лишь немного меньше отверстія зеркала, и поэтому диффракція здѣсь весьма значительна. Напряженность пучка лучей, выходящаго изъ вогнутаго зеркала, мало измѣняется при отклоненіи въ обѣ стороны до 15° и лишь при бѣльшихъ углахъ быстро падаетъ до очень малыхъ значеній.

433 Такъ какъ выходящее изъ вогнутаго зеркала излученіе до нѣкоторой степени направлено опредѣленнымъ образомъ, то

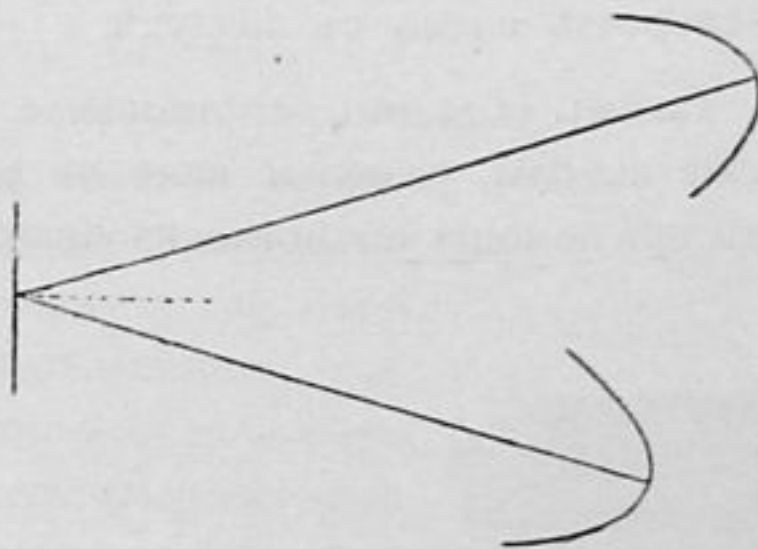


Рис 340. Законъ отраженія волнъ Герца.

посредствомъ него можно показать, что законы преломленія и отраженія свѣтовыхъ лучей справедливы также и для волнъ Герца.

Если вогнутыя зеркала съ осцилляторомъ и пріемникомъ уста-

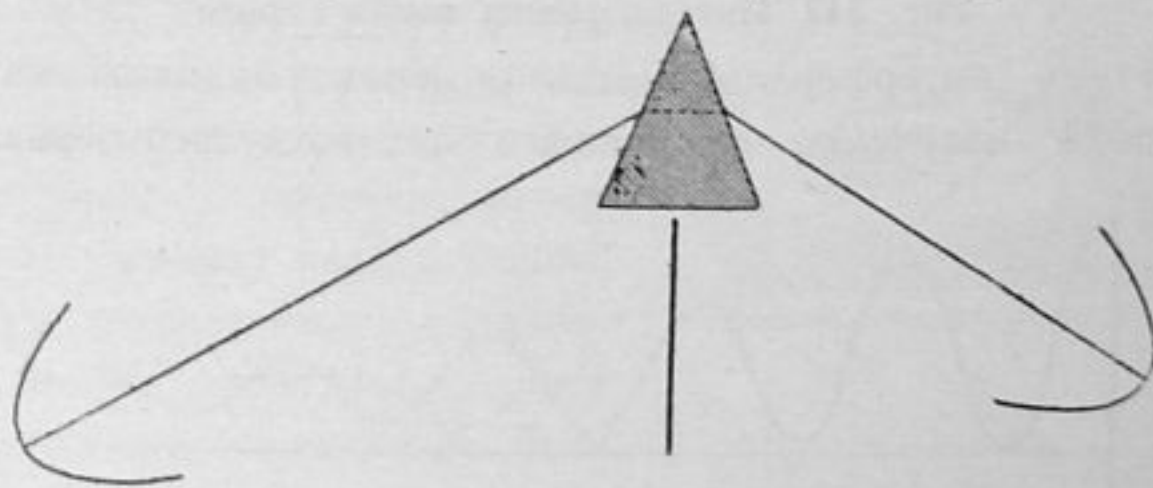


Рис. 341. Преломленіе волнъ Герца въ парафиновой призмѣ.

новлены, какъ показано на рис. 340, такъ чтобы волны не падали на пріемникъ, то ихъ можно посредствомъ отраженія отъ жестяного

листа направить на пріемникъ. Вращая листъ, можно убѣдиться, что максимумъ дѣйствія получается, когда углы, составляемые падающимъ и отраженнымъ лучами съ нормалью къ поверхности зеркала, равны между собою.

Подобнымъ же опытомъ (рис. 341) можно показать, что лучи Герца преломляются призмой изъ изолирующаго вещества (смола, парафинъ и т. п.). Если по углу отклоненія луча вычислить посредствомъ формуль оптики показатель преломленія призмы n , то оказывается, что онъ равняется квадратному корню изъ удѣльной діэлектрической постоянной k вещества призмы: $n = \sqrt{k}$. Изъ общаго ученія о волнахъ извѣстно, что показатель преломленія обратно пропорціоналенъ скорости распространенія волнъ; слѣдовательно, $n = \frac{c_0}{c}$, гдѣ c_0 — скорость волны въ воздухѣ, c — скорость въ преломляющей средѣ. Такимъ образомъ, соотношеніе $n = \sqrt{k}$ подтверждаетъ теоретическіе выводы, развитые нами въ § 424.

434. Наконецъ, при помощи установки, изображенной на рис. 342,



Рис. 342. Интерференція волнъ Герца.

можно путемъ интерференціонныхъ опытовъ убѣдиться въ волновой природѣ излученія, выходящаго изъ вогнутаго зеркала. Оба

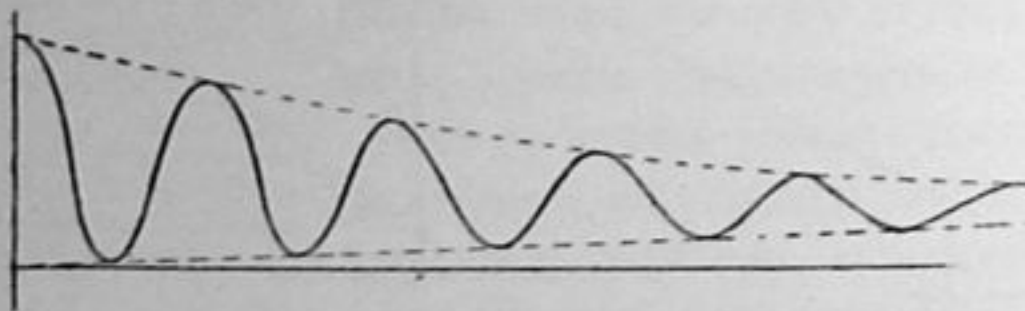


Рис. 343. Кривая интерференціи волнъ Герца, полученная при помощи термоэлектрическаго детектора.

вогнутыя зеркала съ отправителемъ и пріемникомъ поставлены рядомъ, и противъ нихъ расположены два плоскіе жестяные листа,

отражающіе излученіе къ пріемнику. Если одно зеркало перемѣщать впередъ или назадъ, держа его все время параллельно другому, то можно наблюдать интерференцію двухъ отраженныхъ лучей. При помощи термоэлемента получается кривая напряженности, изображенная на рис. 343. Мѣстамъ наименьшей напряженности соотвѣтствуютъ такія положенія второго зеркала, при которыхъ оба отраженные пучка лучей взаимно уничтожаются полностью или большей частью. Это возможно лишь потому, что лучи состоятъ изъ переменныхъ полей, которыя въ этомъ случаѣ слагаются съ противоположными фазами. Это явленіе интерференціи служитъ прямымъ опытнымъ доказательствомъ, что лучи Герца представляютъ собою правильныя волны, распространяющіяся въ пространствѣ съ конечной скоростью. Для того, чтобы отъ одного максимума перейти къ сосѣднему, нужно перемѣстить зеркало на половину длины волны, потому что такое перемѣщеніе измѣняетъ путь излученія, падающаго на перемѣщенное зеркало и отъ него возвращающагося, какъ разъ на длину волны. Такимъ образомъ, посредствомъ интерференціи можно опредѣлять длину волны колебанія осциллятора. Если ее измѣрять, кромѣ того, методомъ Лехера, описаннымъ въ §§ 419 и 425, то получаютъ точно такія же числа. На рис. 343 видно, что интерференціонная кривая по мѣрѣ возрастанія смѣщенія становится все менѣ отчетливой;

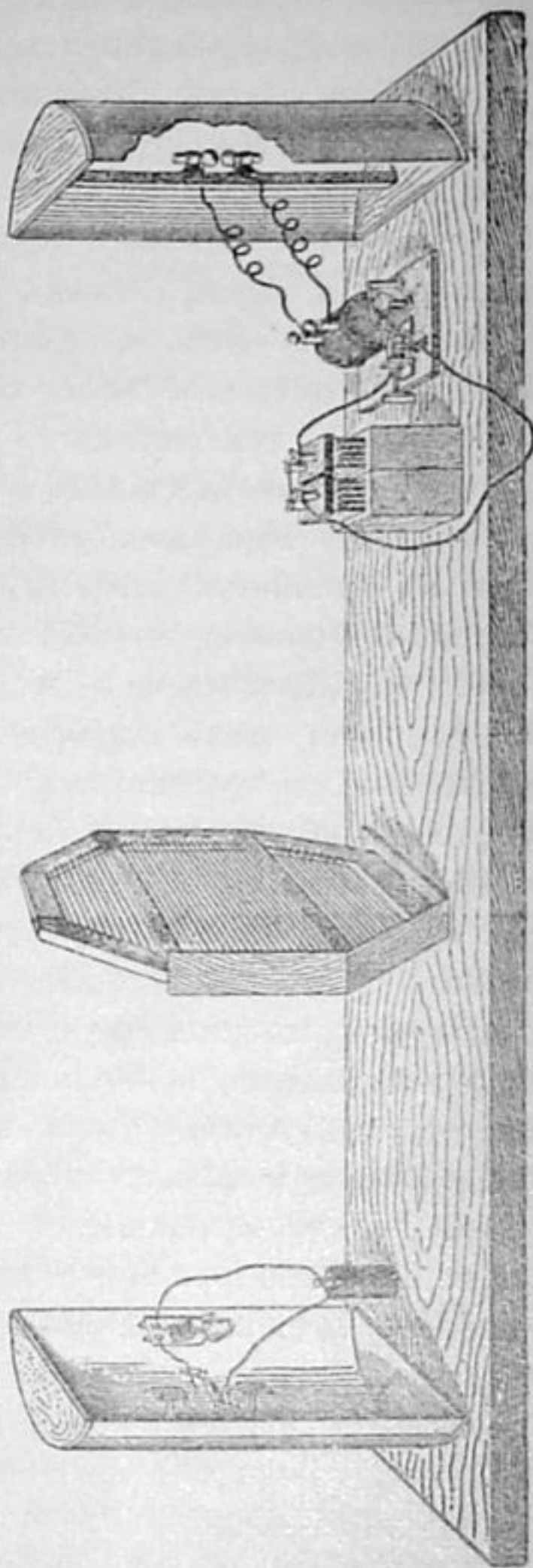


Рис. 344. Поляризація волнь Герца при помощи рѣшетки.

это обстоятельство зависитъ отъ того, что, вслѣдствіе разсѣяніи энергіи, волна, отраженная отъ болѣе удаленнаго зеркала, при слояженіи съ волной, отраженной отъ передняго зеркала, тѣмъ болѣе ослаблена, чѣмъ дальше расположено зеркало.

435. Отраженіе совершается не только отъ сплошныхъ металлическихъ поверхностей, но также и отъ проволочныхъ рѣшетокъ, если отверстія рѣшетокъ малы сравнительно съ длиной волны. Рѣшетка, составленная изъ параллельныхъ проволокъ, разстоянія между которыми значительно меньше длины волны, отражаетъ только такія колебанія, электрическое поле которыхъ параллельно проволокамъ. Если поставить два зеркала Герца точно одно противъ другаго и между ними помѣстить проволочную рѣшетку такъ, чтобы проволоки были параллельны осциллятору, то излученіе не будетъ попадать въ пріемникъ, такъ какъ оно полностью отражается. Если же повернуть рѣшетку на 90° , то излученіе будетъ проходить черезъ нее безпрепятственно, не подвергаясь отраженію. Если рѣшетка повернута подъ какимъ-либо инымъ угломъ, то излученіе разлагается на два слагающихъ: элетрическое колебаніе, параллельное проволокамъ, отражается, а колебаніе, перпендикулярное къ проволокамъ, проходитъ черезъ рѣшетку. Это можно провѣрить на опытѣ, измѣряя интенсивность термоэлементомъ.

Опыты съ рѣшеткой очень ясно показываютъ, что волны, исходящія отъ осциллятора Герца, состоятъ изъ поперечныхъ колебаній, поляризованныхъ прямолинейно, какъ и обыкновенное переменное поле. Если пустить вмѣстѣ двѣ волны, поляризованныя взаимно перпендикулярно и обладающія нѣкоторою разностью фазъ, то онѣ вмѣстѣ составятъ вращающееся электромагнитное поле, распространяющееся со скоростью свѣта; въ болѣе общемъ случаѣ получается эллиптически поляризованное поле. Такое поле можно получить, напримѣръ, отводя параллельные провода отъ осциллятора Лехера или Blondlo къ двумъ антеннамъ, расположеннымъ взаимно перпендикулярно. Если обѣ антенны находятся въ одной плоскости и одну изъ подводящихъ проволокъ осциллятора сдѣлать длиннѣе другой, то исходящія отъ антеннъ волны будутъ имѣть нѣкоторую разность фазъ. Въ зависимости отъ величины послѣдней, результирующія волны будутъ поляризованы по окружности или по эллипсу.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕОРИЯ СВѢТА.

436. Свѣтъ состоитъ изъ волнъ. Дѣйствительно, если отразить свѣтовой лучъ отъ двухъ поверхностей, расположенныхъ одна близко позади другой, — на примѣръ, отъ обѣихъ поверхностей, ограничивающихъ тонкую прозрачную пластинку, то два отраженные луча интерферируютъ между собою. Свѣтовые волны распространяются въ пустотѣ или въ міровомъ эфирѣ со скоростью, равной $3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см.}}{\text{сек.}}$. Свѣтовые волны являются волнами поперечными; помощью такъ называемаго поляризатора можно выдѣлить прямолинейно поляризованныя волны изъ той неправильной смѣси многочисленныхъ волнъ, которую представляетъ собою естественный свѣтъ. Въ качествѣ поляризатора можно воспользоваться полированной поверхностью прозрачнаго тѣла, отражая отъ нея свѣтъ подъ такъ называемымъ „угломъ поляризаціи“; или же можно пропускать свѣтъ черезъ призму Николя (Nicol) изъ известковаго шпата. Изъ прямолинейно поляризованнаго свѣта можно получить свѣтъ, поляризованный по окружности или по эллипсу, пропуская лучи черезъ прозрачную кристаллическую пластинку. Послѣдняя разлагаетъ лучъ на два взаимно перпендикулярно поляризованные луча, которые при прохожденіи черезъ пластинку приобрѣтаютъ нѣкоторую разность фазъ. Такимъ образомъ, свѣтъ вообще имѣетъ характеръ электромагнитныхъ волнъ; онъ отличается отъ волнъ Герца лишь однимъ свойствомъ — чрезвычайной малостью длины волны. Каждый однородный цвѣтъ имѣетъ опредѣленную, ему свойственную, длину волны. Наибольшую длину волны — до $0,79 \mu$ — имѣютъ красные лучи. Наиболе короткими являются фіолетовыя волны; ихъ длина составляетъ $0,39 \mu$ ($1 \mu = 0,001 \text{ м.м.}$). Но въ излученіи раскаленнаго тѣла имѣются, кромѣ того, болѣе длинныя волны, инфракрасныя, къ которымъ глазъ уже не чувствителенъ, и чрезвычайно короткія, ультрафіолетовыя, также не ощущаемыя глазомъ; длина первыхъ доходитъ до 60μ , длина вторыхъ — до $0,1 \mu$ ¹⁾. Бѣлый свѣтъ можно считать смѣсью всевозможныхъ волнъ; онъ состоитъ изъ совершенно неправильнаго, неперіодическаго и весьма быстро мѣняющагося электромагнитнаго поля.

1) Согласно новѣйшимъ изслѣдованіямъ, эти предѣльныя длины волнъ равняются соотвѣтственно 314μ и $0,09 \mu$.

Лучи Рентгена, какъ уже упомянуто въ § 157, по всей вѣроятности, также представляютъ чрезвычайно быстрыя электромагнитныя колебанія, гораздо болѣе быстрыя, нежели свѣтовые. Они относятся къ излученію накаленныхъ тѣлъ примѣрно такъ, какъ это послѣднее къ излученію Герца.

437. Не подлежитъ сомнѣнію, что осцилляторами, испускающими свѣтъ, являются самые атомы вѣсомой матеріи. Характеръ колебаній атомовъ можно опредѣлить путемъ наблюденій надъ свѣтящимися парами металловъ, напримѣръ, ртутной дуговой лампы, или надъ свѣтомъ Гейслеровыхъ трубокъ. Съ помощью спектральнаго аппарата можно убѣдиться, что такой свѣтъ состоитъ изъ ряда чистыхъ синусоидальныхъ волнъ и даетъ такъ называемый линейчатый спектръ; т.-е. онъ испускается осцилляторами, колеблющимися съ ненарушаемой правильной періодичностью, при чемъ различнымъ родамъ осцилляторовъ соотвѣтствуютъ различныя числа періодовъ. Наоборотъ, въ частицахъ твердаго раскаленного тѣла частыя столкновенія и другія вліянія нарушаютъ правильность колебаній, и поэтому такія частицы даютъ неправильныя колебанія, составляющія бѣлый свѣтъ. Если помѣстить источникъ свѣта, осцилляторы котораго испускаютъ правильныя періодическія волны, въ сильное магнитное поле, то, какъ показываетъ наблюденіе, поле закономѣрно вліяетъ на колебанія атомовъ. Каждое чистое синусоидальное колебаніе разлагается замедляющими и ускоряющими силами магнитнаго поля на нѣсколько колебаній съ числами періодовъ, чрезвычайно мало различающимися между собою. Это явленіе называется по имени открывшаго его ученаго явленіемъ Зеемана (Zeeman). Явленіе Зеемана объясняется очень просто, если принять теорію матеріи, изложенную нами въ §§ 210 и 211. Согласно этой теоріи, атомы построены изъ положительно и отрицательно заряженныхъ частицъ. Когда эти частицы колеблются какимъ-либо образомъ около положеній равновѣсія, то колеблются заряды атомовъ, и отъ ихъ полей отшнуровываются электромагнитныя волны, какъ и въ стержневыхъ осцилляторахъ Герца. Магнитное поле дѣйствуетъ съ опредѣленными силами на движущіяся электрическія частицы, и вліяетъ поэтому на колебанія атомныхъ осцилляторовъ; этимъ объясняется въ общихъ чертахъ явленіе Зеемана. Если вычислить силовыя дѣйствія магнитнаго поля, то они оказываются столь малыми, что лишь легчайшія частички могутъ замѣтнымъ образомъ подвергаться ихъ

вліянію. Именно, если принять, что эти частички обладают массою того же порядка, какъ и электроны, то получается порядокъ величины наблюдаемаго явленія Зеемана. Если, кромѣ того, принять во вниманіе знакъ силъ, то изъ наблюденій можно заключить, что колеблющіяся частицы, испускающія свѣтъ линейныхъ спектровъ, должны быть заряжены отрицательнымъ электричествомъ. Изъ этихъ фактовъ слѣдуетъ, что колеблющіяся частички атомовъ, испускающія линейные спектры, тождественны съ электронами, которые могутъ отъ нихъ отщепляться въ видѣ частичекъ, составляющихъ катодные лучи.

При болѣе детальномъ изученіи явленія Зеемана оно оказывается весьма сложнымъ, и обнаруживаются многочисленные его типы. Отсюда заключаютъ, что атомы имѣютъ весьма сложную структуру, что они содержатъ весьма большое число электроновъ, и что колебанія, вообще, сводятся къ довольно сложнымъ движеніямъ многочисленныхъ электроновъ, связанныхъ между собою силовыми дѣйствіями. Колебанія, совершаемыя одинаковымъ числомъ одинаково связанныхъ электроновъ, должны поэтому давать всегда одинъ и тотъ же типъ явленія Зеемана. Особенное мѣсто среди всѣхъ химическихъ элементовъ занимаетъ гелій. Мы познакомились съ этимъ веществомъ при описаніи радіоактивныхъ явленій (§ 200): частички, составляющія положительные α -лучи, выбрасываемыя при самопроизвольныхъ взрывахъ атомовъ, всегда представляютъ собою атомы гелія. Гелій имѣетъ довольно сложный спектръ, состоящій изъ многихъ линій, но всѣ эти линіи обнаруживаютъ явленіе Зеемана одного и того же типа. На каждую линію гелія магнитное поле вліяетъ такимъ образомъ, какъ если бы она испускалась колебаніями одной только отрицательной электрической частички, совершающей свои колебанія около положенія равновѣсія по закону маятника. Въ этомъ простомъ случаѣ можно посредствомъ несложной формулы опредѣлить по величинѣ явленія Зеемана отношеніе заряда колеблющейся частички къ ея массѣ. По измѣреніямъ Ломана (W. Lohmann) для всѣхъ линій гелія получается одна и та же величина, а именно $1,77 \cdot 10^8$ кулоновъ на граммъ. Эта величина какъ-разъ равняется отношенію заряда къ массѣ для электроновъ, полученному изъ новыхъ измѣреній надъ катодными лучами (§ 153). Въ виду этого результата невозможно сомнѣваться, что наиболѣе про-

стыя электрическія колебанія въ атомѣ гелія представляютъ собою колебанія электроновъ въ атомѣ.

438. Когда свѣтовой лучъ переходитъ въ другую прозрачную среду, онъ преломляется совершенно такъ же, какъ и лучи Герца (§ 433). Но показатель преломленія для чрезвычайно быстрыхъ электромагнитныхъ колебаній свѣта вообще отличается отъ показателя преломленія для болѣе медленныхъ Герцовыхъ колебаній, равнаго $n = \sqrt{k}$ (§ 433). Именно, показатель преломленія для свѣта значительно измѣняется въ зависимости отъ длины волны; чѣмъ меньше длина волны, тѣмъ больше вообще показатель преломленія. Какъ мы видѣли въ § 88, удѣльная діэлектрическая постоянная k (а слѣдовательно, и показатель преломленія для медленныхъ колебаній) вѣсомыхъ діэлектриковъ отличается отъ единицы потому, что электрическое поле въ матеріальныхъ молекулахъ и атомахъ вызываетъ перемѣщенія элементарныхъ электрическихъ частицъ, изъ которыхъ они составлены. Если эти перемѣщенія происходятъ не моментально, но вслѣдствіе инертности частицъ требуютъ опредѣленнаго промежутка времени того же порядка, что и продолжительность свѣтового колебанія, то показатель преломленія для этихъ быстрыхъ свѣтовыхъ колебаній долженъ быть инымъ, нежели для медленныхъ колебаній, дающихъ частицамъ достаточно времени для перемѣщенія. Для полнаго теоретическаго объясненія оптическихъ свойствъ прозрачныхъ тѣлъ слѣдуетъ непременно имѣть въ виду, что діэлектрическія смѣщенія частицъ въ молекулахъ не происходятъ путемъ одного единственнаго движенія, такъ сказать аперіодически, но при этомъ должны происходить затухающія колебанія вокругъ окончательнаго положенія. Особенно замѣчательны оптическія свойства тѣлъ для такихъ свѣтовыхъ колебаній, числа которыхъ близки къ числу собственныхъ колебаній молекулярныхъ частицъ, такъ что становится замѣтнымъ резонансъ. Въ этомъ случаѣ наблюдается очень сильное поглощеніе и очень сильное отраженіе, связанное съ такъ называемой аномальной дисперсіей.

Особую главу составляютъ оптическія свойства металловъ, которые сильно отражаютъ какъ свѣтовые лучи всѣхъ родовъ, такъ и волны Герца; этимъ металлы отличаются отъ всѣхъ прочихъ тѣлъ. Весьма замѣчательно, что электролиты, которые вслѣдствіе своей хорошей проводимости сильно поглощаютъ и отражаютъ лучи Герца, обладаютъ относительно свѣта такими же свойствами, какъ

и всѣ прочія прозрачныя тѣла. Причину этого различія слѣдуетъ искать въ томъ, что грубые, трудно подвижныя іоны электролитовъ не могутъ или почти не могутъ слѣдовать за быстрыми свѣтовыми колебаніями, тогда какъ переменныя электрическія поля Герцовыхъ волнъ ихъ увлекаютъ съ собой. Въ металлахъ проводящія частицы представляютъ собою чрезвычайно легкіе электроны, которые могутъ слѣдовать даже за столь быстрыми колебаніями, какъ свѣтовыя. Въ видимой части спектра число періодовъ уже лежитъ въ области, гдѣ и электроны постепенно перестаютъ слѣдовать за колебаніями, и потому при переходѣ къ фіолетовой части замѣтно уменьшается отражательная способность всѣхъ металловъ. Для волнъ Герца отражательная способность металла вполне можетъ быть вычислена по его проводимости и числу періодовъ волнъ; чѣмъ больше проводимость, тѣмъ лучше металлъ отражаетъ. Если бы мы примѣнили формулы, справедливыя для длинныхъ волнъ, къ видимой части спектра, то вообще получили бы слишкомъ большія значенія для отражательной способности, такъ какъ здѣсь инерція электроновъ уже играетъ роль, которая не учитывается теоріей. Отклоненія вычисленныхъ значеній отъ измѣренныхъ тѣмъ меньше, чѣмъ больше длина волны. Для волнъ, длина которыхъ превышаетъ 10 μ (ультракрасныя лучи), измѣренія, выполненныя Гагеномъ (Hagen) и Рубенсомъ (Rubens), даютъ почти точно такія же величины, какъ простая формула, общепризнанная для области волнъ Герца. Если обозначимъ черезъ R отражательную способность металла въ процентахъ, то число $A = 100 - R$ представитъ процентное количество излученія, вступающее въ металлическую пластинку и тамъ поглощаемое. Нижеслѣдующая таблица даетъ значенія этой величины A для излученія съ длиной волны $\lambda = 12 \mu$, какъ измѣренныя Гагеномъ и Рубенсомъ, такъ и вычисленныя изъ проводимости.

Поглощеніе въ металлическихъ пластинкахъ, $\lambda = 12 \mu$. По Гагену и Рубенсу

	Ag	Cu	Au	Pt	Ni	Ві	Патентъ- никкель P	Патентъ- никкель M	Константанъ	Сплавъ Розе	Сталь
Измѣренныя величины	1,15	1,6	2,1	3,5	4,1	17,8	5,7	7,0	6,0	7,1	4,9
Вычисленныя . . .	1,3	1,4	1,6	3,5	3,6	11,5	5,4	6,2	7,4	7,3	4,6

Если не считать висмута, который, повидимому, является исключеніемъ среди металловъ, то оказывается, что къ излученію съ длинной волны 12 м металлы относятся почти совершенно такъ же, какъ къ волнамъ Герца.

Измѣренія Гагена и Рубенса доказываютъ непосредственно, что шкала свѣтовыхъ лучей представляетъ собою ни что иное, какъ продолженіе шкалы Герцовыхъ лучей.

ТЕЛЕГРАФИРОВАНИЕ БЕЗЪ ПРОВОДОВЪ.

439. Впервые волны Герца примѣнилъ къ телеграфированію Маркони (Marconi) въ 1895 году. Отправителемъ беспроводнаго телеграфа служитъ осцилляторъ съ передающей антенной; пріемникъ представляетъ собою антенну съ детекторомъ. Отправляющая станція посылаетъ ряды волнъ черезъ условные промежутки времени, напримѣръ, по буквенной системѣ Морзе. Принимающая станція пе-

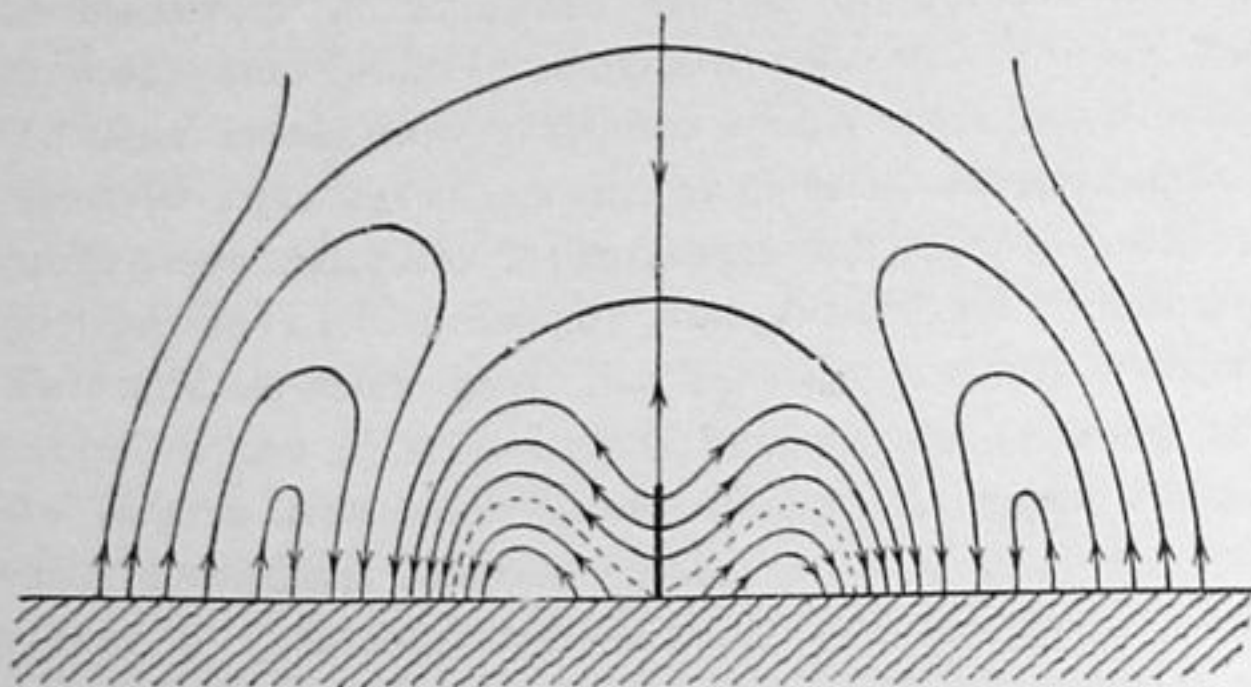


Рис. 345. Длинныя электрическія волны, распространяющіяся отъ антенны.

рехватываетъ эти ряды волнъ, и въ детекторѣ ея получаютъ понятные сигналы. Изобрѣтеніе Маркони основано, главнымъ образомъ, на примѣненіи сильно излучающаго отправителя и очень чувствительнаго детектора.

Волны, при помощи которыхъ работаетъ беспроводный телеграфъ, всегда имѣютъ большую длину, достигающую нѣсколькихъ сотенъ или даже нѣсколькихъ тысячъ метровъ. Только въ такія относительно медленныя колебанія можно преобразовать большія количества энергіи. Передающая антенна въ своей простѣйшей формѣ

представляетъ вертикальную проволоку, длина которой должна быть близка къ четверти длины волны, чтобы вверху она имѣла узелъ, а внизу — пучность. Внизу антенна соединяется либо съ землею, либо съ проводникомъ большой емкости, такъ называемымъ противовѣсомъ. Рисунокъ 345, на которомъ изображены силовыя линіи, показываетъ, какъ распространяются волны, исходящія отъ антенны. Внизу онѣ должны скользить вдоль поверхности земли.

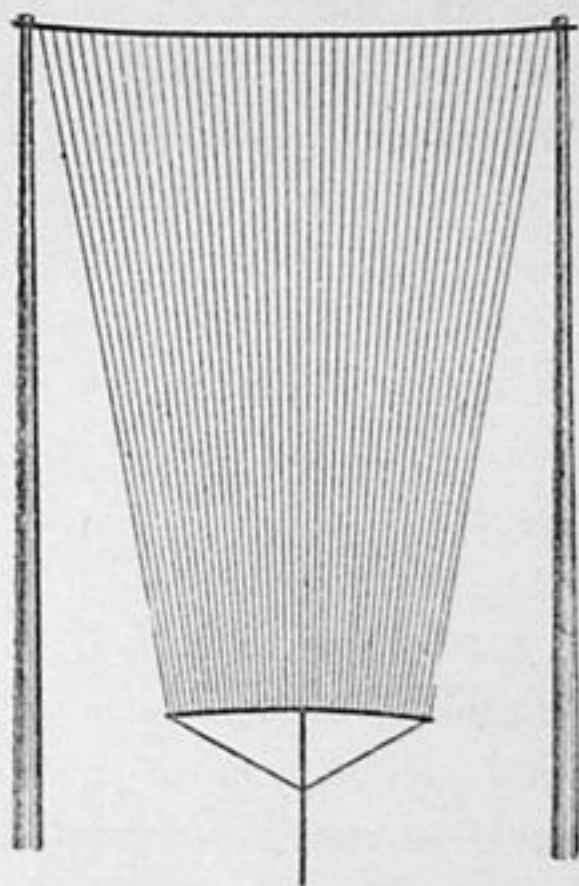


Рис. 346. Антенна въ видѣ арфы.

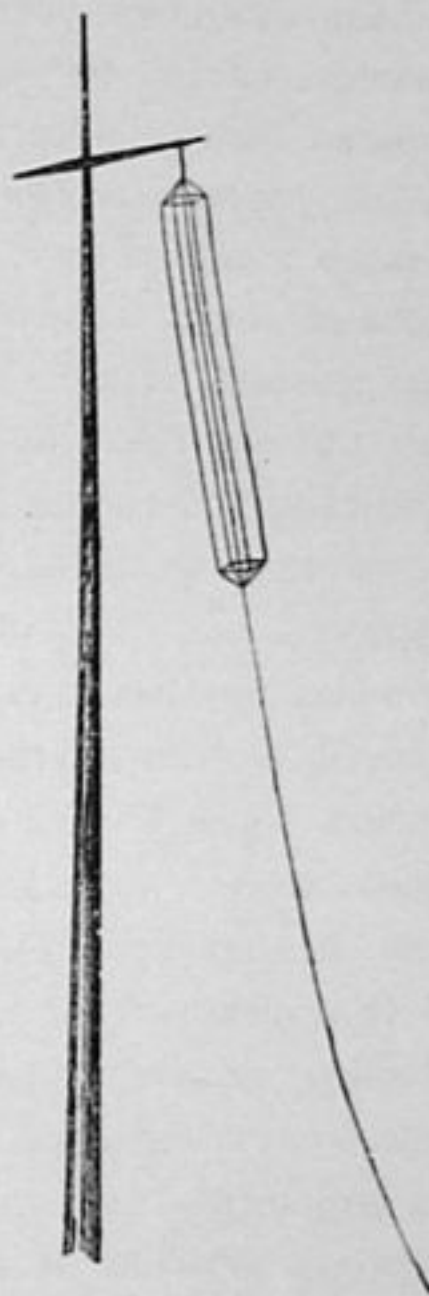


Рис. 347. Кѣлочная антенна,

Такимъ образомъ, въ беспроводномъ телеграфѣ землею пользуются въ качествѣ проводника, и волны слѣдуютъ за формой земной поверхности; онѣ могутъ огибать горы и распространяться вокругъ земного шара. Такое участіе земли влечетъ за собой вредное слѣдствіе: благодаря своей плохой проводимости земля поглощаетъ довольно много энергіи. Интенсивность волнъ вслѣдствіе этого убываетъ не обратно пропорціонально квадрату разстоянія, а нѣсколько быстрее. Хорошо проводящая морская вода поглощаетъ гораздо

меньше энергіи, нежели плохо проводящая влажная земля. Поэтому на морѣ можно телеграфировать на болѣе далекое разстояніе, нежели на сушѣ.

440. Чтобы увеличить излучающую способность передающей антенны, ей придаютъ значительные размѣры. Маркони при своихъ опытахъ на итальянскомъ военномъ кораблѣ Carlo Alberto пользовался такъ называемой арфовой антенной (рис. 346). Особенно полезнымъ оказалось увеличеніе емкости верхняго конца антенны, какъ у изображенной на рис. 347 клѣточной антенны. Такая антенна вбираетъ больше энергіи, нежели простая проволока, и потому сильнѣе излучаетъ. Особенно большая емкость получается, если отъ верхняго конца вертикальной мачты антенны натянуть широкій проволочный зонтъ, конечно, хорошо изолированный отъ земли. Почву подъ зонтомъ дѣлаютъ хорошо проводящей при помощи вложенныхъ въ нее проволокъ, и такимъ путемъ получаютъ огромный конденсаторъ большой емкости. На рис. 348 представлена нѣсколько схематически подобная зонтичная антенна, которою пользуются, на примѣръ, на опытной станціи Науэнъ (Nauen) около Берлина. Зонтичная антенна имѣетъ, собственно, меньшую излучающую способность, нежели другія, совершенно открытыя антенны; однако, она вбираетъ гораздо большія количества энергіи, и потому съ ея помощью можно посылать въ пространство гораздо болѣе сильныя волны, нежели при помощи иныхъ антеннъ.

Пріемная антенна подобна передающей; вообще говоря, одною антенною можно пользоваться какъ для отправленія, такъ и для пріема волнъ; въ первомъ случаѣ ее соединяютъ съ осцилляторомъ, а во второмъ — съ детекторомъ. Чтобы не нарушить резонанса, детекторъ обычно не вводится въ самую антенну, но связывается съ нею индуктивно.

441. Детекторъ представляетъ едва ли не важнѣйшую составную часть всего аппарата; онъ лежитъ въ основѣ какъ изобрѣтенія Маркони, такъ и новѣйшаго развитія беспроводнаго телеграфа. Существуютъ два рода детекторовъ: во - первыхъ, детекторы, отвѣчающіе только на первую часть ряда волнъ, при чемъ дальнѣйшія волны не играютъ роли; во - вторыхъ, детекторы, суммирующіе дѣйствіе всѣхъ волнъ, перехваченныхъ антенною. Детекторы каждаго рода, въ свою очередь, распадаются на два класса. Детекторами перваго рода являются 1) когереръ и 2) магнитные детекторы;

детекторами второго рода: 3) электрическіе клапаны и 4) термометрическіе детекторы.

Детекторъ, впервые примѣненный на практикѣ Маркони, представляетъ собою когереръ Бранли; о принципѣ этого аппарата мы уже говорили въ § 429. Его чрезвычайно большой чувствительности Маркони обязанъ своими первыми удачными опытами, доказавшими возможность телеграфировать безъ проводовъ. Въ теченіе многихъ лѣтъ послѣ этого когереръ былъ наиболѣе употребительнымъ детекторомъ. Для правильнаго дѣйствія когереръ долженъ быть изготовленъ весьма тщательно. Металлическія зерна должны быть изслѣдованы съ помощью лупы каждое въ отдѣльности; нужно брать лишь зерна съ острыми ребрами и углами. Продолговатыя зерна не годятся, такъ какъ они легко сцѣпляются и даютъ поэтому длительные контакты. Но больше всего нужно позаботиться о тщательной просушкѣ зеренъ; ихъ помѣщаютъ вмѣстѣ съ электродами въ стеклянныя трубки, которыя освобождаютъ отъ влаги путемъ эвакуаціи и запаиваютъ (рис. 349). Дѣйствительно хорошій когереръ никогда не долженъ быть подвергаемъ дѣйствию сильныхъ электрическихъ токовъ; поэтому ни въ какомъ случаѣ его нельзя включать въ цѣпь вызывного звонка или пишущаго телеграфнаго аппарата. Когереръ включается всегда въ

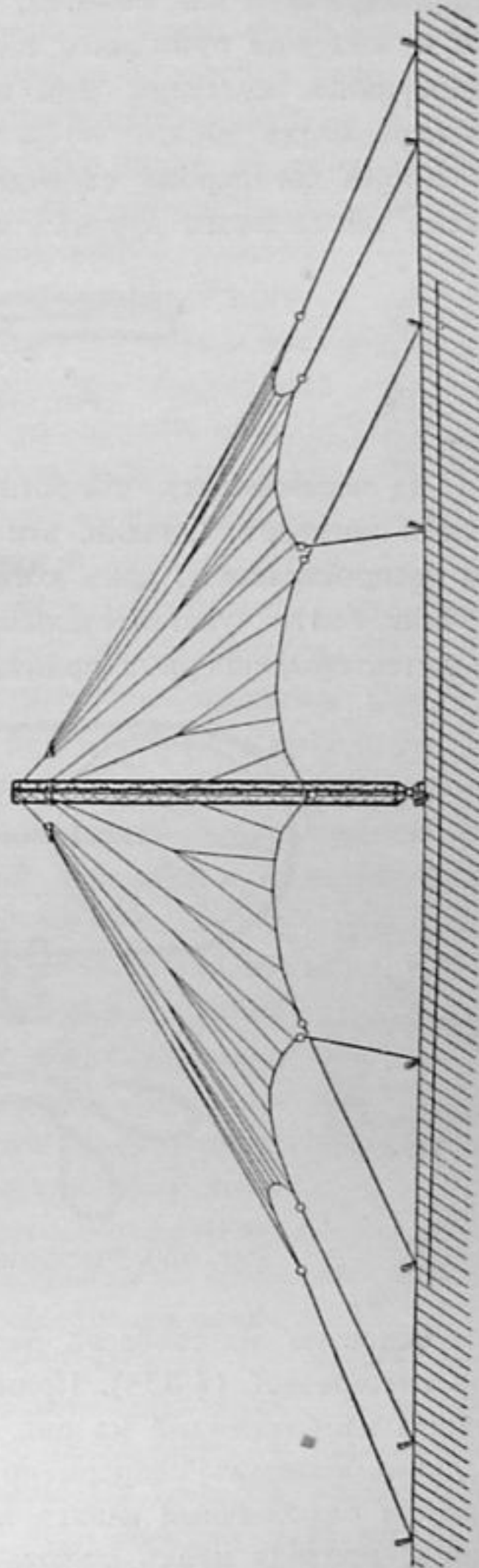


Рис. 348. Антенна въ видѣ зонтика. (Для отчетливости задняя половина зонтика не изображена).

цѣль слабаго тока релѣ, которое замыкаетъ токи для самого сигнальнаго аппарата и для молотка, „расцѣпляющаго“ когереръ. Кромѣ того, нужно еще примѣнять соотвѣтственныя приспособленія, чтобы предохранить когереръ отъ высокихъ напряженій, возникающихъ при перерывахъ тока.

Кромѣ когереровъ съ металлическимъ порошкомъ, было предложено также много другихъ когереровъ, дѣйствіе которыхъ осно-

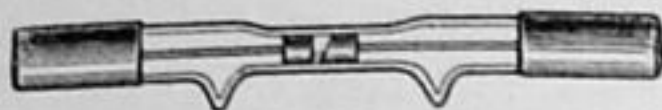


Рис. 349. Когереръ.

вано на переменныхъ сопротивленіяхъ при контактѣ, напримѣръ, ртутный когереръ. Однако, эти когереры не получили такого широкаго распространенія, какъ когереръ съ металлическимъ порошкомъ.

Еще болѣе чувствительными, чѣмъ когереръ, являются магнитныя детекторы, впервые примѣненные также Маркони. Ихъ дѣй-

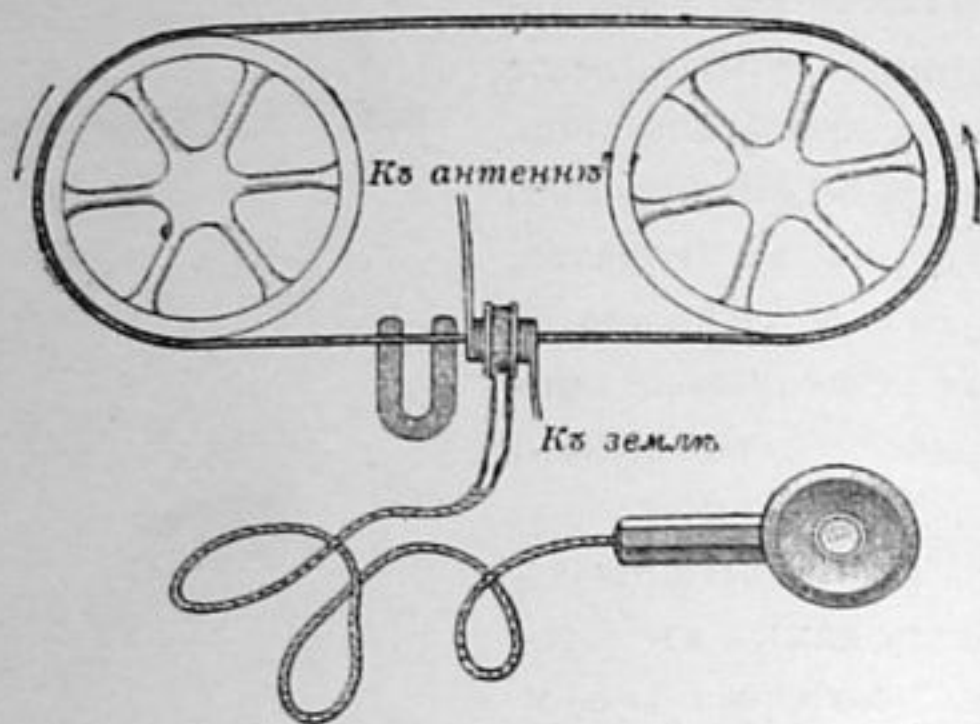


Рис. 350. Магнитный детекторъ Маркони.

ствіе основано на свойствѣ переменныхъ магнитныхъ полей понижать гистерезисъ (§ 334). Примѣромъ магнитнаго детектора можетъ служить изображенный на рис. 350 магнитный детекторъ Маркони. По двумъ колесамъ, непрерывно вращаемымъ небольшимъ моторомъ, движется безконечный канатъ изъ туго натянутыхъ желѣзныхъ проволокъ, проходя предъ полюсами сильнаго подковообразнаго магнита. Сейчасъ же за магнитомъ проволока проходитъ черезъ катушку,

приключенную къ приемной антеннѣ. На эту катушку насажена другая катушка, замкнутая на чувствительный телефонъ. Пока на антенну не попадаютъ волны, намагничение, которое проволока имѣетъ вслѣдствіе гистерезиса послѣ прохожденія передъ магнитомъ, остается въ катушкѣ постояннымъ. Но когда на антенну падаютъ волны, онѣ вызываютъ въ катушкѣ переменное магнитное поле высокой частоты, вслѣдствіе чего остаточное намагничение желѣзной проволоки понижается. Благодаря этому, каждый рядъ волнъ вслѣдствіе индукціи сопровождается трескомъ въ телефонѣ. Каждой искрѣ, проскакивающей въ осцилляторѣ передатчика, соответствуетъ отдѣльный трескъ, а болѣе длинному ряду искрѣ соответствуетъ столь же продолжительный шумъ. Поэтому въ телефонѣ можно различать точки и штрихи азбуки Морзе и такимъ путемъ принимать телеграмму.

Особенно разнообразны детекторы третьяго класса. Ихъ устройство основано на дѣйствіи электрическихъ клапановъ, и они выдѣляютъ изъ переменныхъ напряженій электрической волны одинаково направленные импульсы, дѣйствующие затѣмъ на релѣ или на чувствительный гальванометръ. Въ качествѣ примѣра такого детектора назовемъ прежде всего весьма употребительный электролитическій элементъ Шлёмильха (Schlömilch). Онъ представляетъ собою небольшой сосудъ (рис. 351) съ разбавленной сѣрной кислотой, въ которую погружены два платиновые электрода, соединенные съ гальваническимъ элементомъ. Напряжение этого элемента должно быть выбрано такъ, чтобы оно едва замѣтно превышало максимальное напряжение поляризаціи элемента Шлёмильха. Поэтому при обычныхъ условіяхъ въ цѣпи идетъ лишь весьма слабый токъ. Детекторъ включается въ приемный аппаратъ; когда на него падаютъ волны, то, благодаря напряженію электрическихъ колебаній, въ теченіе cadaго полупериода, когда оно имѣетъ одинаковое направленіе съ напряженіемъ элемента, преодолевается напряжение поляризаціи, въ силу чего каждый разъ происходитъ толчокъ тока. Въ теченіе времени, пока длится рядъ волнъ, на включенный гальванометръ дѣйствуетъ толчокъ сильнаго тока, равный

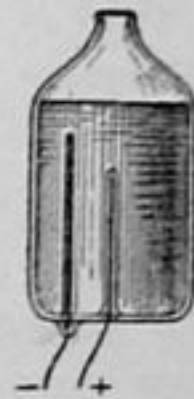


Рис. 351
Электролитическій детекторъ Шлёмильха.

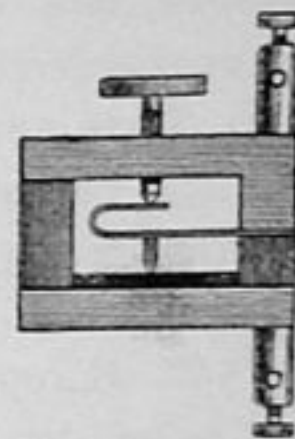


Рис. 352. Детекторъ изъ свинцоваго блеска Брауна (для лабораторныхъ опытовъ).

суммѣ многихъ малыхъ толчковъ, соответствующихъ отдѣльнымъ полуперіодамъ. Такимъ образомъ, элементъ Шлёмильха принадлежитъ къ тѣмъ детекторамъ, въ которыхъ всѣ отдѣльныя волны ряда слагаются для общаго дѣйствія. Практика показала, что надежность и чувствительность этого детектора тѣмъ больше, чѣмъ меньше поверхность анода. Въ виду этого въ качествѣ анода берутъ тончайшую Вульстеневскую проволоку, запаянную въ стеклянной трубчкѣ и возможно короче срѣзанную у мѣста запайки. Вторымъ практически важнымъ примѣромъ детекторовъ этого класса является детекторъ Брауна (Braun) изъ свинцоваго блеска. На рис. 352 онъ представленъ въ формѣ, удобной для лабораторныхъ цѣлей. На маленькую пластинку изъ свинцоваго блеска опирается съ чрезвычайно слабымъ давленіемъ заостренный графитовый штифтикъ. Благодаря этому, возникаетъ контактное сопротивление, которое въ одномъ направленіи гораздо меньше, чѣмъ въ другомъ. Если колебанія достигаютъ детектора, то въ первомъ направленіи проходитъ токъ, во второмъ же онъ либо вовсе не проходитъ, либо чрезвычайно слабъ. Всѣ одинаково направленные импульсы слагаются въ одинъ толчокъ тока, которымъ приводится въ дѣйствіе релэ. Направленіе лучшей проводимости контакта зависитъ отъ давленія графитоваго острія на пластинку свинцоваго блеска.

Термометрическіе детекторы представляютъ собою либо термоэлементы, либо болометры (§ 267). Съ ихъ помощью прямо измѣряется полная энергія прибывающаго ряда волнъ, какъ мы видѣли уже въ § 430. Такіе детекторы до сихъ поръ не играли большой роли въ практикѣ беспроводнаго телеграфа. Возможно, однако, что въ детекторѣ Брауна дѣйствуютъ также термоэлектрическія силы, такъ что и онъ, собственно, принадлежитъ къ этому классу.

442. Исторію развитія беспроводнаго телеграфа можно раздѣлить на два періода по роду детекторовъ, въ немъ примѣнявшихся. Первый періодъ характеризуется почти исключительнымъ примѣненіемъ введенныхъ Маркони детекторовъ первой группы, т.-е. когерера и магнитнаго детектора. Въ то время техника ставила себѣ цѣлью, главнымъ образомъ, испускать изъ антенны передатчика медленный рядъ очень сильныхъ импульсовъ энергіи (отъ 10 до 20 въ секунду). Для этой цѣли въ осцилляторѣ пользовались медленнымъ рядомъ очень мощныхъ искръ при возможно болѣе высокомъ напряженіи. Въ старѣйшемъ и простѣйшемъ передатчикѣ Маркони (рис. 353)

осцилляторъ есть вмѣстѣ и антенна, какъ въ простомъ осцилляторѣ Герца; отъ этого послѣдняго онъ отличается лишь гораздо большей длиной волны и еще тѣмъ, что нижняя половина осциллятора замѣнена землею; во многихъ установкахъ этотъ передатчикъ вскорѣ былъ вытѣсненъ передатчикомъ Брауна (рис. 354). Въ послѣднемъ осцилляторъ представляетъ отдѣльную замкнутую колебательную цѣпь, связанную съ антенной индуктивно или гальванически. Этотъ передатчикъ удобнѣе простого передатчика Маркони потому, что въ закрытомъ осцилляторѣ, вслѣдствіе его значительно большей емкости, при данномъ искровомъ напряженіи скопляется гораздо больше энергіи, чѣмъ въ полѣ антенны. Въ цѣпи осциллятора получаютъ очень сильныя токи, малое искровое сопротивленіе и потому малыя



Рис. 353. Передатчикъ Маркони.

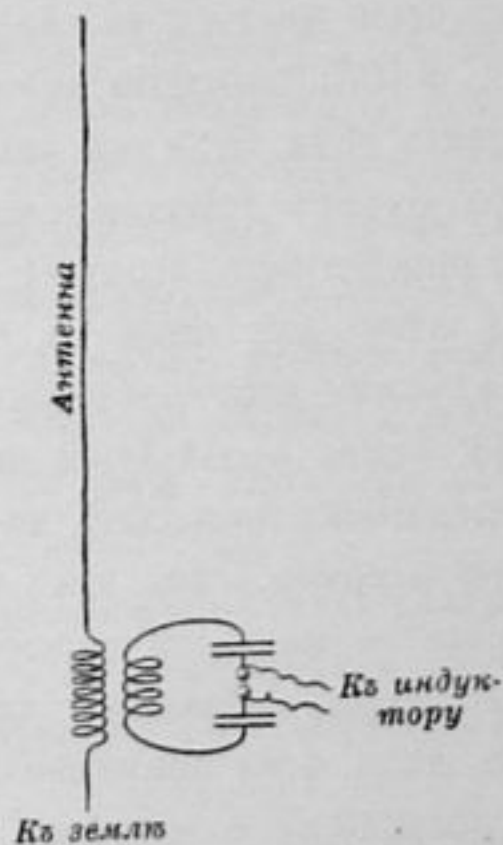


Рис. 354. Передатчикъ Брауна.

потери въ искрѣ. Антенна, настроенная на осцилляторъ, играетъ совершенно такую же роль, какъ вторичная катушка въ трансформаторѣ Тесла; въ ней напряженія достигаютъ чрезвычайно высокихъ значеній при малой силѣ тока, что необходимо для излученія большихъ количествъ энергіи. Но для напряженія существуетъ верхній предѣлъ, обусловливаемый искрящимися разрядами, которые всегда сопровождаютъ высокія напряженія (§ 409) и вызываютъ значительныя потери энергіи. Поэтому, для дальнѣйшаго увеличенія излученія энергіи начали придавать антеннѣ бѣольшую емкость (ср. § 440),

благодаря чему она можетъ вбирать большія количества энергіи безъ опаснаго повышенія напряженія.

Чтобы возможно лучше использовать энергію, доставляемую осциллятору электрическими генераторами, и вмѣстѣ съ тѣмъ по возможности уменьшить потери доставляемой энергіи въ искрѣ и въ проводахъ, необходимо, чтобы энергія быстро переносилась отъ осциллятора на антенну. Поэтому антенну тѣсно связываютъ съ осцилляторомъ. Тѣсная связь влечетъ за собою, конечно, ущербъ, съ которымъ въ передатчикѣ Брауна приходится мириться: какъ мы видѣли въ § 405, сильная связь вызываетъ біенія. Такъ какъ біенія мы можемъ разсматривать, какъ результатъ наложенія двухъ рядовъ волнъ, различающихся немного по числу періодовъ, то можно сказать, что передатчикъ Брауна излучаетъ одновременно двѣ различныя волны. Но пріемная антенна должна быть точно настроена, чтобы возможно было достигнуть наибольшаго максимума амплитуды колебаній (ср. § 403), который является рѣшающимъ для дѣйствія детектора перваго рода. Если же антенна настроена невѣрно, то дѣйствіе детектора будетъ гораздо слабѣе. Когда же имѣются двѣ волны, какъ въ передатчикѣ Брауна, то антенна можетъ быть настроена лишь на одну изъ нихъ, и потому около половины излучаемой энергіи остается неиспользованной.

443. Когда пользуются детекторомъ перваго рода, то осцилляторъ передатчика приводятъ въ дѣйствіе медленно слѣдующими одна за другой искрами, такъ какъ при болѣе быстромъ слѣдованіи искръ не получается никакого усиленія дѣйствія детектора, и слишкомъ обильныя искры вызываютъ лишь напрасную трату энергіи. Иначе обстоитъ дѣло, если примѣняется детекторъ втораго рода. Въ этомъ случаѣ получается одинаковое дѣйствіе, попадаетъ ли на передатчикъ большое число слабыхъ волнъ или же малое число сильныхъ волнъ, ибо рѣшающее значеніе имѣетъ не величина амплитуды, но лишь количество энергіи, получаемой въ теченіе секунды. Выгодно даже питать осцилляторъ болѣе слабыми, но быстро слѣдующими одна за другой искрами, такъ какъ тогда невозможны потери черезъ разряды на антеннѣ.

То же самое можно сказать и о длинѣ рядовъ волнъ. Если на пріемникъ съ детекторомъ перваго рода падаетъ столько волнъ, что амплитуда пріемника достигаетъ своего максимума, то дальнѣйшія волны ряда излишни, такъ какъ дѣйствіе детектора зависитъ

только отъ амплитуды переменнаго напряженія, а не отъ продолжительности его. При употребленіи детектора перваго рода дѣйствительно использованной оказывается лишь первая часть ряда волнъ, и если ряды волнъ, выходящіе отъ передатчика, слишкомъ длинны, т.-е. взять осцилляторъ съ очень медленнымъ затуханіемъ колебаній, то происходитъ напрасная трата энергіи. Детекторъ же втораго рода, напротивъ, дѣйствуетъ тѣмъ лучше, чѣмъ длиннѣе ряды волнъ; длинные ряды слабыхъ волнъ даютъ такое же дѣйствіе, какъ короткіе ряды сильныхъ волнъ.

При этомъ слѣдуетъ еще имѣть въ виду, что настраиваніе на длинные ряды волнъ должно быть гораздо точнѣе, чѣмъ на короткіе, если желательно вполнѣ использовать ихъ энергію. Если настроить не вполнѣ точно, но все же такъ, чтобы при первыхъ волнахъ имѣли мѣсто лишь небольшія разности фазъ между волною и колебаніемъ пріемника, то разность фазъ возрастаетъ пропорціонально числу волнъ; и если рядъ волнъ очень длиненъ, то доходитъ даже до того, что колебаніе волны направлено противоположно колебаніямъ пріемника и ихъ ослабляетъ. Въ этомъ случаѣ болѣе позднія колебанія, вліяющія на детекторъ, оказываются, такимъ образомъ, значительно уменьшенными, и въ детекторѣ втораго рода получается значительно меньшее дѣйствіе, чѣмъ въ случаѣ весьма точной настройки. Въ детекторѣ же перваго рода такая же разница въ настройкѣ не была бы замѣчена.

Когда пользуются длинными рядами не затухающихъ волнъ и детекторомъ втораго рода, то получается гораздо болѣе полный резонансъ, чѣмъ при употребленіи детектора перваго рода.

Полный резонансъ обладаетъ многими весьма важными практическими преимуществами. Можно взять волны столь малой интенсивности, чтобы только совершенно точно настроенный пріемникъ воспроизводилъ сигналы. Если двѣ станціи по взаимному соглашенію пользуются секретнымъ, вполнѣ опредѣленнымъ числомъ колебаній, то постороннимъ лицамъ, не знающимъ этого числа колебаній, очень трудно перехватить телеграмму, тогда какъ станціи могутъ сноситься между собою съ большимъ удобствомъ. вмѣстѣ съ тѣмъ пріемная станція, антенна которой сильно резонируетъ лишь на вполнѣ опредѣленное число колебаній, не обременяется телеграммами другихъ чиселъ колебаній, для нея не предназначенными. Та-

кимъ образомъ, въ пространствѣ одновременно можетъ идти очень много телеграммъ, при чемъ каждая станція получаетъ только для нея предназначенныя телеграммы. Устраненіе возмущеній, составляющее едва ли не важнѣйшую задачу беспроволочной телеграфіи, проще всего достигается употребленіемъ длинныхъ рядовъ волнъ съ малымъ затуханіемъ и малой амплитуды и примѣненіемъ детекторовъ второго рода.

Такимъ образомъ, пока употреблялись исключительно детекторы перваго рода, необходимо было, чтобы передатчикъ излучалъ ряды волнъ, медленно слѣдующіе другъ за другомъ и возможно болѣе интенсивные, но относительно быстро прекращающіеся. Когда же въ практику были введены детекторы второго рода, очередной задачей сдѣлалось полученіе рядовъ волнъ, быстро слѣдующихъ другъ за другомъ и относительно слабыхъ, но очень длинныхъ и съ медленнымъ затуханіемъ. Лишь съ разрѣшеніемъ этой задачи переходъ къ детекторамъ второго рода явился крупнымъ успѣхомъ техники.

444. Получить очень длинные ряды волнъ высокой частоты, пригодные для беспроволочнаго телеграфированія, удалось впервые въ началѣ 1906 года датскому инженеру Паульсену при помощи его дуговой лампы (ср. § 413). Однако, болѣе точныя испытанія обнаружили, что дуговая лампа Паульсена не удовлетворяетъ поставленнымъ требованіямъ. Какъ мы видѣли въ § 413, число періодовъ колебаній свѣтовой дуги зависитъ не только отъ емкости и самоиндукціи колебательной цѣпи, но также и отъ свойствъ свѣтовой дуги. Такъ какъ свѣтовая дуга лампы Паульсена не можетъ оставаться совершенно постоянной, то и продолжительность ея колебанія также не остается постоянной. Это обстоятельство весьма вредитъ полнотѣ резонанса. Но главнымъ недостаткомъ лампы Паульсена является ея весьма малая отдача. Большая часть затраченной энергіи поглощается въ сопротивленіяхъ и въ свѣтовой дугѣ, и лишь небольшая часть получается изъ антенны въ видѣ электромагнитныхъ волнъ. Поэтому полученіе достаточной энергіи для телеграфированія требуетъ большихъ машинъ для возбужденія электрическаго тока, что особенно неудобно для переносныхъ станцій. Кроме того, чтобы получить не слишкомъ малую отдачу, нужно пользоваться возможно болѣе медленными колебаніями, вслѣдствіе чего антенны должны быть очень велики, и весь аппаратъ становится крайне неудобнымъ.

445. Въ 1906 году М. Винъ открылъ методъ возбужденія толчками весьма мало затухающихъ колебаній. Этотъ методъ послѣ того былъ технически разработанъ Обществомъ Беспроволочной Телеграфіи (Gesellschaft für drahtlose Telegraphie). На практикѣ въ качествѣ колебательной цѣпи берутъ прямо антенну, съ которой сильно связанъ возбудитель толчковъ. Такимъ образомъ, аппаратъ для возбужденія толчковъ, примѣняемый въ беспроводномъ телеграфѣ, похожъ на передатчикъ Брауна (рис. 354). Отъ послѣдняго онъ отличается, главнымъ образомъ, лишь искровымъ промежуткомъ, который устраивается такъ, чтобы искра быстро затухала. Когда искра въ возбуждающей цѣпи прекращается, самый осцилляторъ колеблется совершенно такъ же, какъ простой передатчикъ Маркони безъ искрового промежутка. Поэтому энергія теряется только въ видѣ теплоты тока въ проволоку антенны и на излученіе волнъ. Главную роль играетъ первая потеря, но и она мала въ сравненіи съ потерями энергіи у искрового осциллятора, которыя влечетъ за собой искра, и сообразно съ этимъ затуханіе колебанія незначительно. Такимъ образомъ, получается продолжительный рядъ волнъ, амплитуда которыхъ падаетъ лишь медленно и постепенно (рис. 318). Кромѣ того, возможно еще уменьшить затуханіе, вызываемое излученіемъ; для этого нужно лишь свернуть часть антенны въ видѣ широкой катушки, такъ чтобы часть антенны, выдающаяся свободно въ воздухъ, сдѣлалась короче. Тогда антенна излучаетъ меньше, и амплитуда испускаемыхъ волнъ также уменьшается, но вмѣстѣ съ тѣмъ ряды волнъ будутъ нѣсколько менѣе затухающими. Наивыгоднѣйшую длину свободной антенны необходимо опредѣлить практически, путемъ опытовъ.

Важнѣйшею частью прибора, служащаго для возбужденія толчковъ, является искровой промежутокъ. Онъ работаетъ надежно, лишь если искра никогда не задерживается и накаливаніе электродовъ на ея концахъ поэтому не мѣшаетъ быстрому исчезновенію проводимости искрового промежутка. Наиболѣе практичнымъ оказался искровой промежутокъ съ большими плоскими кольцеобразными металлическими электродами, находящимися на весьма маломъ разстояніи другъ отъ друга. При проскакиваніи искры, она подъ дѣйствіемъ магнитнаго поля тока переносится внаружу (ср. § 289), и потому не можетъ удержаться на мѣстѣ. Особенно выгодно дѣлать электроды изъ металла, обладающаго большой теплопровод-

ностью; лучше всего пользоваться мѣдью, покрытою слоемъ серебра. Чтобы имѣть возможность достигать бѣльшихъ разрядныхъ напряженій и потому бѣльшихъ амплитудъ колебанія, включаютъ послѣдовательно рядъ короткихъ кольцевыхъ искровыхъ промежутковъ. Такой искровой промежутокъ представленъ на рис. 355. Чѣмъ бѣльшя разрядная напряженія мы желаемъ примѣнять, тѣмъ больше должно быть число кольцевыхъ искровыхъ промежутковъ. Если же желательно перейти къ болѣе низкимъ напряженіямъ, то нѣкоторые изъ нихъ просто замыкаются на короткую.

Мы видѣли, что при употребленіи детекторовъ второго рода — только о нихъ, конечно, и можетъ быть рѣчь при затухаемыхъ

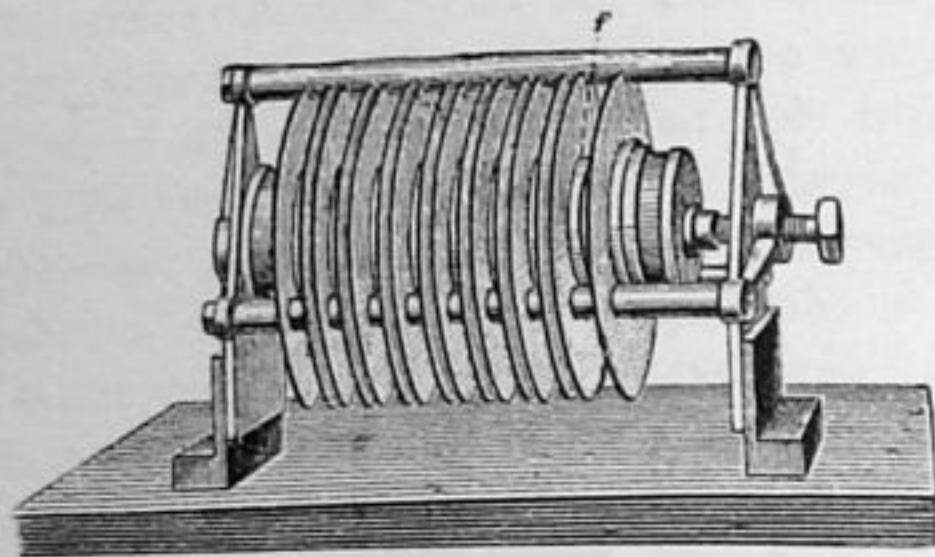


Рис. 355. Искровой промежутокъ передатчика съ возбужденіемъ толчками. *f*—отдѣльный кольцевой искровой промежутокъ.

искрахъ — нужно пользоваться искрами, быстро слѣдующими одна за другой. Чтобы добиться возможно полнаго постоянства числа искръ въ секунду, Общество Безпроводочной Телеграфіи употребляетъ для возбужденія затухающихъ искръ переменное напряжение (между 4000 и 70 000 вольтъ); при тщательномъ выборѣ длины искрового промежутка, т.-е. числа кольцевыхъ промежутковъ, и емкости искровой цѣпи искра проскакиваетъ лишь при каждомъ максимумѣ переменнаго напряжения. Число періодовъ генератора переменнаго тока выбираютъ между 250 и 1000 въ секунду, такъ что число искръ составляетъ отъ 500 до 2000. Если въ пріемникѣ пользуются телефономъ, соединеннымъ съ детекторомъ, и телеграмму принимаютъ на слухъ, то въ телефонѣ получается чистый и ясный музыкальный тонъ, число колебаній котораго равняется числу искръ передатчика. Если каждая станція имѣетъ особое число

искръ, то этимъ еще вѣрнѣе предотвращается возможность возмущеній. Кромѣ того, для усиленія звука можно еще пользоваться резонанснымъ релэ, которымъ также уничтожаются всякіе другіе звуки, поступающіе въ пріемникъ. Резонансное релэ можетъ примѣняться также и для пишущаго телеграфа.

Конечно, отсутствіе возмущеній гарантируется, главнымъ образомъ, свойствомъ передатчика съ затухающей искрой высылать слабо затухающія волны только одного опредѣленнаго рода. Настройка на эти волны гораздо точнѣе, чѣмъ на волны передатчиковъ Брауна и Паульсена, почему телеграмма можетъ получаться съ очень удаленныхъ станцій безъ возмущеній, даже если совсѣмъ близко испускаются волны другими передатчиками. Число колебаній отправителя можно измѣнять простымъ образомъ, включая или выключая въ антеннѣ и искровой цѣпи нѣсколько витковъ. При этомъ очень удобно то обстоятельство, что не требуется совершенно точной настройки. Продолжительность колебаній испускаемыхъ волнъ зависитъ только отъ всей длины антенны. Если желательно очень сильно измѣнить продолжительность колебанія, то слѣдуетъ перемѣнить конденсаторъ искровой цѣпи и воздушный проводъ антенны. Вообще говоря, въ телеграфѣ съ описываемымъ передатчикомъ можно взять на выборъ волны различной длины, а именно — отъ 200 до 5000 метровъ. Это обстоятельство очень важно, такъ какъ даетъ возможность избѣгать возмущеній и въ томъ случаѣ, когда одновременно работаетъ много станцій.

Большимъ преимуществомъ системы затухающихъ искръ является большая отдача осциллятора. Такъ какъ колебаніе въ замкнутой первичной цѣпи длится лишь очень короткое время, и энергія очень быстро передается во вторичную цѣпь, то въ первичной цѣпи поглощается лишь немного энергіи, тогда какъ искра передатчика Брауна, напримѣръ, поглощаетъ значительную часть всей энергіи въ теченіе всего того времени, пока длятся колебанія. Изъ всего количества энергіи, доставляемаго генераторомъ переменнаго тока, около 70% поступаютъ въ антенну въ видѣ энергіи колебаній и здѣсь частью тратятся на неизбѣжную теплоту тока, а частью излучаются. Лишь 30% поглощаются въ трансформаторъ высокаго напряженія и въ искровой цѣпи. Поэтому вся установка занимаетъ очень мало мѣста и весьма удобна.

Большая отдача передатчика съ затухающей искрой означаетъ не только экономію энергіи, но также и отсутствіе вредныхъ и нежелательныхъ побочныхъ дѣйствій, которыя въ другихъ системахъ вызываються теряемой частью энергіи. Сильныя искры передатчика Брауна потребляютъ много энергіи на то, чтобы накалять электроды искрового промежутка и постепенно ихъ разрушать, и на сопровождающій ихъ оглушительный шумъ. Весьма цѣннымъ преимуществомъ затухающихъ искръ является, во-первыхъ, то обстоятельство, что электроды почти не изнашиваются, и потому ихъ лишь рѣдко приходится мѣнять, и, во-вторыхъ, отсутствіе шума на передающей станціи. Благодаря этому высылаемые ряды волнъ могутъ получить указанное выше полезное свойство.—давать чистый музыкальный тонъ.

По существу, описанная система звучащихъ затухающихъ искръ является, вѣроятно, наиболѣе совершенной системой возбужденія колебаній для беспроволочнаго телеграфа,—подобно тому, какъ современная форма динамомашины является совершеннымъ типомъ электрическаго генератора; въ деталяхъ, можетъ быть, она еще будетъ улучшена, но навѣрное не будетъ превзойдена другими системами. Зато разрѣшеніе другихъ задачъ беспроволочной телеграфіи и, прежде всего, проблемы посыланія электрическихъ волнъ по опредѣленному направленію, а также разрѣшеніе проблемы беспроволочнаго телефонированія всецѣло принадлежитъ будущему.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ.

ПРИНЦИПЪ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.

ИНЕРЦИЯ МАТЕРІИ ЗАВИСИТЬ ОТЪ ПРОЦЕССОВЪ, ПРОИСХОДЯЩИХЪ ВЪ ЭѲИРЪ.

446. Согласно электронной теоріи, невозможно мыслить матерію отдѣльно отъ единой міровой субстанціи — эѲира. Движенія атомовъ по существу представляютъ собою лишь извѣстныя измѣненія въ эѲирѣ, происходящія въ немъ повсюду тамъ, гдѣ его внутреннія силы не находятся въ равновѣсіи. Такимъ образомъ, движеніе никоимъ образомъ не является процессомъ, который пространственно ограниченъ самимъ атомомъ, какъ предполагалось прежде: вмѣстѣ съ перемѣщеніемъ въ эѲирѣ узловъ силовыхъ полей, которые мы называемъ „электронами“, „іонами“ или „атомами“, измѣняются и окружающія ихъ поля. Чтобы получить нѣсколько болѣе опредѣленное представленіе объ этихъ процессахъ, мы сначала оставимъ безъ вниманія всѣ недостаточно извѣстныя намъ состоянія эѲира, каковымъ, на примѣръ, является тяготѣніе, и займемся исключительно свойствами электромагнитнаго поля, окружающаго іонъ.

Электронъ или іонъ вмѣстѣ съ окружающимъ его электрическимъ полемъ можетъ перемѣщаться въ эѲирѣ лишь въ томъ случаѣ, если онъ окруженъ магнитнымъ полемъ въ видѣ окружностей, которое служитъ для перенесенія электрическихъ напряженій. Это магнитное поле безусловно участвуетъ въ тѣхъ процессахъ, которые въ своей совокупности образуютъ то, что мы называемъ движеніемъ. Но магнитное поле содержитъ въ себѣ энергію; поэтому вокругъ движущагося іона энергія эѲира больше, нежели около неподвижнаго іона, и для приведенія іона въ движеніе нужно какимъ-либо образомъ доставить ему то количество энергіи, которое необходимо, чтобы уравновѣситъ эту разность. Это количество энергіи мы называемъ энергіей движенія іона. Она есть не что иное, какъ энергія

магнитнаго поля, увеличенная, можетъ быть, еще на нѣкоторое количество энергіи, необходимое для иныхъ, еще неизвѣстныхъ, процессовъ въ эфирѣ, также связанныхъ съ движеніемъ іона. Сила магнитнаго поля пропорціональна скорости, съ которой движется іонъ; его энергія, какъ вообще энергія движенія, пропорціональна второй степени силы поля, а, слѣдовательно, и второй степени скорости.

Когда іонъ или электронъ приводятся въ движеніе, то должны возникнуть напряженія, которыя взаимно уравновѣшиваются и возбуждаютъ магнитное поле. Эти напряженія возникаютъ вслѣдствіе того, что электрическія силовыя линіи вокругъ электрона нѣсколько перемѣщаются изъ своего положенія равновѣсія, когда электронъ начинаетъ двигаться; при этомъ поле получаетъ нѣкоторую асимметричность, связанную съ такимъ дѣйствіемъ на электронъ, которое противодѣйствуетъ возникающему движенію. Эта асимметричность около электрона и связанная съ нею сила существуютъ до тѣхъ поръ, пока движеніе не становится стационарнымъ.

Эту силу въ механикѣ называютъ реакціей инертной массы электрона. Точнѣе говоря, это реакція магнитнаго поля, возникающаго въ окружающемъ электронъ эфирѣ, или сопротивленіе инерціи магнитнаго поля. Это сопротивленіе инерціи уравновѣшивается другой силой, дѣйствующей на электронъ въ противоположномъ направленіи — движущей силой. Черезъ нее электронъ получаетъ энергію, которую можно вычислить, какъ работу движущей силы; но вслѣдствіе того, что электронъ движется противъ силы реакціи магнитнаго поля, эта работа тотчасъ же передается далѣе электромагнитному полю, и здѣсь распредѣляется, согласно теоремѣ Пойнтинга, въ видѣ энергіи магнитнаго поля, связаннаго съ движеніемъ. Нѣчто подобное можно было бы, вѣроятно, сказать и о силѣ реакціи, или инерціи, иныхъ, пока еще неизвѣстныхъ „процессовъ движенія“ въ эфирѣ, которая, можетъ быть, вмѣстѣ съ магнитной инерціей образуетъ полную инертную массу электрона. Если движущійся узелъ поля переходитъ въ состояніе покоя, то магнитное поле должно исчезнуть, и тогда возникаетъ сила реакціи, направленная въ сторону движенія. Чтобы ее преодолѣть, необходимо употребить силу, противоположную движенію, и, такимъ образомъ, электронъ отдаетъ обратно въ видѣ работы энергію магнитнаго поля и, быть можетъ, также другихъ, еще неизвѣстныхъ, процессовъ въ эфирѣ, сопровождающихъ движеніе.

Согласно электронной теоріи, инерція матеріальной частицы представляетъ собою не что иное, какъ инерцію магнитнаго поля и, можетъ быть, еще другихъ, пока неизвѣстныхъ, явленій въ эфирѣ, составляющихъ существенную часть всего процесса движенія, но не ограниченныхъ малымъ объемомъ узловыхъ мѣстъ въ эфирѣ.

Согласно этому воззрѣнію, механика, всегда разсматривавшая понятіе инерціи, какъ элементарное, простѣйшее понятіе, должна потерять свое положеніе основной науки. Не эфиръ слѣдуетъ объяснять механически, но матерію — электромагнетизмомъ. Механическія аналогіи, о которыхъ часто шла рѣчь въ этой книгѣ, не являются попытками глубже проникнуть въ сущность эфира, такъ какъ въ дѣйствительности механическіе процессы могутъ быть поняты лишь на основѣ электромагнитныхъ. Но какъ это бываетъ и въ другихъ случаяхъ, въ данной области явленія, логически болѣе сложныя и болѣе трудныя для пониманія, привычѣе нашимъ представленіямъ, нежели явленія, болѣе простыя въ смыслѣ понятій; поэтому мы и могли пользоваться механическими явленіями въ качествѣ примѣровъ, облегчающихъ пониманіе.

447. Изъ точки зрѣнія электронной теоріи на инерцію вытекаетъ весьма замѣчательное слѣдствіе. Магнитное поле вокругъ движущагося электрона должно двигаться черезъ эфиръ вмѣстѣ съ электрическимъ полемъ. Но это можетъ происходить только при томъ условіи, чтобы электрическое поле вокругъ движущагося электрона вызывало въ тѣхъ мѣстахъ, откуда оно удаляется, исчезновеніе магнитнаго поля, а тамъ, гдѣ оно появляется, — возникновеніе магнитнаго поля. Это, въ свою очередь, возможно лишь въ томъ случаѣ, если электрическое поле вокругъ движущагося электрона само по себѣ не находится въ равновѣсіи, какъ это имѣетъ мѣсто около покоющагося электрона. Болѣе точный математическій анализъ этого процесса на основѣ двухъ Максвелловыхъ законовъ электродинамики указываетъ, что у движущагося электрона радіальныя электрическія силовыя линіи нѣсколько удаляются отъ полюсовъ, лежащихъ по линіи движенія, и тѣснѣе собираются въ области экватора (рис. 356). Если скорость движенія поля мала въ сравненіи со скоростью распространенія свободныхъ электромагнитныхъ импульсовъ энергіи, т.-е. съ величиною $3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см.}}{\text{сек.}}$, то различіе въ поляхъ электроновъ движу-

щагося и покоющагося столь незначительно, что оно не можетъ быть замѣчено ни при какомъ явленіи, доступномъ наблюденію. Но чѣмъ больше скорость движенія, тѣмъ сильнѣе становится это различіе, и, когда скорость приближается къ критической величинѣ $3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см.}}{\text{сек.}}$, поле становится совершенно отличнымъ отъ статическаго поля. Вслѣдствіе этого энергія электромагнитнаго поля очень быстро движущагося электрона при измѣненіи скорости измѣняется совершенно иначе, чѣмъ та же энергія въ случаѣ медленно движущагося электрона; сообразно съ этимъ сила реакціи, возникающая при опредѣленномъ ускореніи движенія, при большихъ скоростяхъ будетъ не такой, какъ при малыхъ. Короче говоря, инертная масса электрона есть

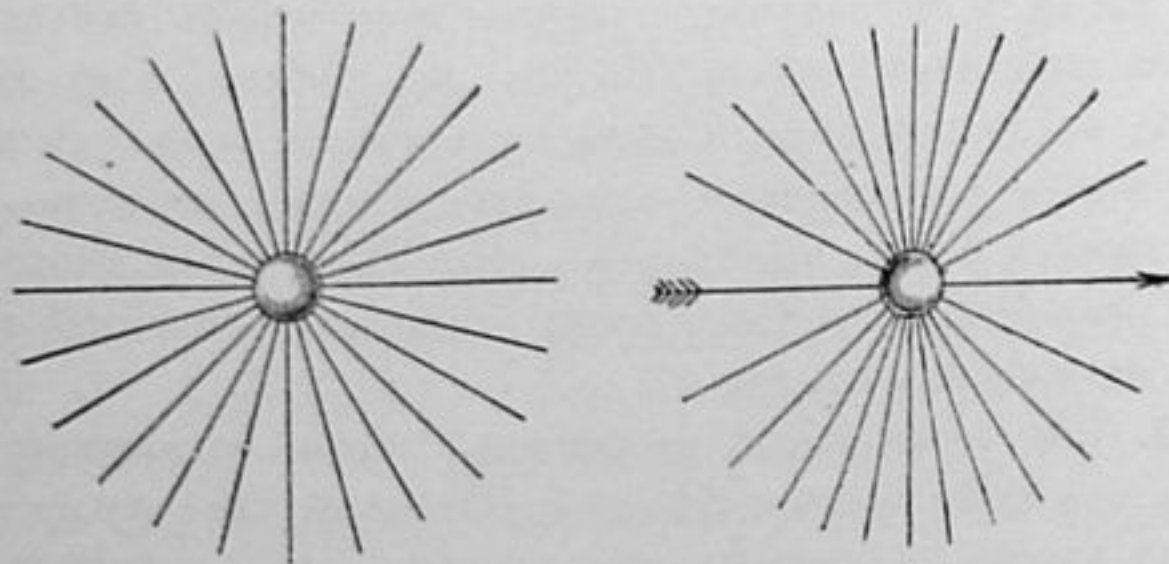


Рис. 356. Электрическое поле покоющагося и движущагося электроновъ.

функція скорости, съ которою онъ движется. Измѣненію направленія скорости поле также противодѣйствуетъ съ нѣкоторою силою, вообще извѣстною подъ именемъ центробѣжной силы. При медленномъ движеніи инерція поля, или инертная масса электрона, изъ которой можно по извѣстной формулѣ механики вычислить центробѣжное сопротивленіе, въ точности равняется инерціи, которая проявляется при дѣйствительномъ измѣненіи величины скорости, т.-е. при ускореніи. При весьма большихъ скоростяхъ оба инерціонныя свойства измѣняются различно, и тогда необходимо строго различать продольную инертную массу электрона, проявляющуюся въ противодѣйствіи измѣненію величины скорости при постоянномъ направленіи, и поперечную инертную массу, дѣйствіе которой проявляется въ центробѣжной силѣ, когда скорость остается постоянной по величинѣ, а измѣняется направленіе движенія. При опытахъ съ откло-

неніемъ катодныхъ лучей въ электрическомъ или въ магнитномъ полѣ, сила отклоняющаго поля уравниваетъ центробѣжную силу частицъ. Такимъ образомъ, въ формулахъ §§ 150-151 m обозначаетъ поперечную инертную массу электрона, а въ формулахъ § 149 — продольную массу. Зарядъ e электрона, или элементарное количество электричества, рассматривается въ физикѣ эфира, какъ абсолютная константа. Путемъ измѣренія магнитнаго и электрическаго отклоненій весьма быстрыхъ электронныхъ лучей можно поэтому обнаружить, измѣняется ли поперечная инертная масса въ зависимости отъ скорости и насколько. Если E есть сила отклоняющаго электрическаго поля въ $\frac{\text{вольтъ}}{\text{см.}}$, ρ_1 — радиусъ кривизны лучей въ этомъ полѣ, B — силовой потокъ отклоняющаго магнитнаго поля въ $\frac{\text{вольтъ сек.}}{\text{кв. см.}}$ и ρ_2 — радиусъ кривизны лучей въ этомъ полѣ, то, согласно §§ 150—151, мы должны положить

$$a = 10^7 \cdot E \cdot \rho_1; \quad b = 10^7 \cdot B \cdot \rho_2;$$

мы получимъ тогда:

$$\frac{e}{m} = \frac{a}{b}; \quad v = \frac{a}{b}.$$

Очень быстрыми электронными лучами являются β -лучи радиоактивныхъ веществъ, и слѣдуетъ полагать, что на нихъ возможно наблюдать измѣненіе инертной массы въ зависимости отъ скорости. Дѣйствительно, Кауфманнъ (Kaufmann), а послѣ него и другіе экспериментаторы подтвердили правильность этого предположенія. Кауфманну мы обязаны большимъ рядомъ чрезвычайно тщательныхъ измѣреній, которыя даютъ намъ представленіе о томъ, по какому закону измѣняется инерція электрона съ возрастаніемъ скорости. Методъ измѣренія заключался въ одновременномъ примѣненіи электрическаго и магнитнаго полей, одинаково направленныхъ. Вслѣдствіе этого пучокъ β -лучей, выдѣленный черезъ узкія діафрагмы, испытывалъ одновременно два отклоненія въ двухъ взаимно-перпендикулярныхъ направленіяхъ. Затѣмъ онъ падалъ на фотографическую пластинку и давалъ здѣсь изображеніе, отклоненія котораго отъ нулевой точки, т.-е. отъ изображенія неотклоненныхъ γ -лучей и почти неотклоненныхъ α -лучей, могли быть измѣрены при помощи точнаго компаратора. Изображеніе отклоненныхъ лучей всегда оказывалось вытянутымъ въ длинную черту, такъ какъ скорость β -частицъ имѣетъ весьма различныя значенія. Во время экспозиціи весь аппаратъ сильно

эвакуировался, такъ что не происходило вовсе диффузнаго разсѣянія β -лучей. Такимъ путемъ были получены рѣзкіе, тонкіе штрихи. Послѣ достаточно продолжительной экспозиціи электрическое поле обращалось, при чемъ все прочее оставалось безъ измѣненія, и вторично производилась столь же продолжительная экспозиція. Такимъ образомъ получились двѣ кривыя, вполнѣ симметричныя относительно прямой, проходящей черезъ нулевую точку перпендикулярно къ направлению полей; для каждой отдѣльной точки этихъ кривыхъ можно было измѣрить отклоненія перпендикулярно и параллельно къ силовымъ линиямъ. Отсюда можно было, зная размѣры аппарата, вычислить оба радіуса кривизны ρ_1 и ρ_2 такимъ же путемъ, какъ и въ § 150. Если, наконецъ, извѣстны величины E и B , то для каждой точки кривой могутъ быть вычислены скорость v и отношеніе $\frac{e}{m}$. Хотя Кауфманнъ произвелъ эти въ высшей степени трудныя измѣренія съ чрезвычайной тщательностью, его числа, повидимому, не совсѣмъ вѣрны, вслѣдствіе погрѣшности, источникъ которой до сихъ поръ еще неизвѣстенъ. Такъ, для скорости наименѣе отклоненныхъ, наименѣе гибкихъ лучей получается величина, превышающая скорость свѣта, что неприемлемо по теоретическимъ соображеніямъ; но и помимо этого, если экстраполировать по надлежащимъ формуламъ въ обратномъ направленіи, то числа даютъ для малыхъ скоростей значеніе $\frac{e}{m}$, гораздо большее, чѣмъ величина $1,75 \cdot 10^8$, полученная на основаніи новѣйшихъ очень точныхъ измѣреній. Разница такова, какъ если бы мы приписали силѣ электрическаго поля E слишкомъ большое значеніе. Поэтому въ нижеслѣдующей таблицѣ, которая составлена по даннымъ Кауфманна, данное имъ значеніе E исправлено путемъ умноженія его на 0,895. При такой поправкѣ измѣренія Кауфманна наилучшимъ образомъ согласуются съ упомянутыми измѣреніями надъ катодными лучами.

Измѣренія Кауфманна надъ β -лучами.

a	b	$v = a : b$	$\beta = v : 3 \cdot 10^{10}$	$\frac{e}{m} = a : b^2$
$1146,0 \cdot 10^{10}$	412,6	$2,778 \cdot 10^{10}$	0,926	$0,673 \cdot 10^8$
$749,8 \cdot 10^{10}$	290,3	$2,583 \cdot 10^{10}$	0,861	$0,890 \cdot 10^8$
$561,7 \cdot 10^{10}$	232,1	$2,420 \cdot 10^{10}$	0,807	$1,043 \cdot 10^8$
$437,1 \cdot 10^{10}$	192,7	$2,268 \cdot 10^{10}$	0,756	$1,177 \cdot 10^8$
$347,7 \cdot 10^{10}$	165,8	$2,097 \cdot 10^{10}$	0,699	$1,264 \cdot 10^8$
$281,7 \cdot 10^{10}$	145,4	$1,938 \cdot 10^{10}$	0,646	$1,333 \cdot 10^8$
$234,0 \cdot 10^{10}$	129,4	$1,808 \cdot 10^{10}$	0,603	$1,395 \cdot 10^8$
$200,7 \cdot 10^{10}$	117,6	$1,706 \cdot 10^{10}$	0,569	$1,450 \cdot 10^8$
$169,2 \cdot 10^{10}$	106,0	$1,599 \cdot 10^{10}$	0,533	$1,504 \cdot 10^8$

Отсюда видно, что значеніе $\frac{e}{m}$ для большихъ скоростей измѣняется вполнѣ опредѣленнымъ образомъ: оно тѣмъ меньше, чѣмъ ближе скорость v къ скорости свѣта. Если мы предположимъ, что количество e постоянно, то отсюда слѣдуетъ, что поперечная инертная масса электрона возрастаетъ тѣмъ больше, чѣмъ ближе его скорость къ скорости свѣта.

Теорія позволяетъ предсказать такую зависимость. Такъ какъ энергія электрическаго поля, какъ мы видѣли въ § 25, имѣетъ наименьшее значеніе въ томъ случаѣ, когда его напряженія взаимно уравновѣшиваются, то электрическое поле быстро движущагося электрона содержитъ больше энергіи, нежели въ случаѣ медленнаго движенія. Но большому содержанію энергіи всегда соотвѣтствуетъ, какъ можно доказать математически, и бѣольшая инерція. Абрагамъ (Abraham) точно вычислилъ, какъ въ зависимости отъ скорости измѣняются продольная и поперечная массы электрически заряженнаго шара, зарядъ и форма котораго постоянны. Такимъ путемъ, дѣйствительно, получается теоретически такой же законъ измѣненія массы, какой даютъ экспериментальныя измѣренія Кауфманна. Болѣе точное количественное изслѣдованіе этого вопроса мы приведемъ въ § 461. Здѣсь мы упомянемъ только, что сначала физики были склонны заключить изъ совпаденія теоріи съ опытомъ, что вся масса (по крайней мѣрѣ, электроновъ) имѣетъ электромагнитную природу, такъ что центробѣжная сила и сопротивленіе измѣненіямъ скорости у нихъ должны полностью быть сведены къ силамъ реакціи ихъ электромагнитнаго поля. Это заключеніе нужно, однако, признать слишкомъ поспѣшнымъ. Въ самомъ дѣлѣ, если въ движеніи играютъ роль еще иные процессы въ эѳирѣ, — на примѣръ, такіе, которые находятся въ болѣе тѣсной связи съ тяготѣніемъ, — то эти процессы, можетъ быть, подчиняются такимъ законамъ, что связанное съ ними инертное сопротивленіе измѣняется въ зависимости отъ скорости совершенно такъ же, какъ и сопротивленіе электромагнитнаго поля. Какъ мы увидимъ ниже, имѣются серьезныя основанія полагать, что существуютъ общіе законы, которымъ подчиняются всѣ процессы въ эѳирѣ, и потому мы не будемъ заходить столь далеко въ развитіи выводовъ, вытекающихъ изъ измѣреній Кауфманна.

т.-е. отклоненіе отъ прямой линіи. Представимъ себѣ, что мы находимся въ поѣздѣ желѣзной дороги, движемся по совершенно ровнымъ, гладкимъ рельсамъ, такъ что его движеніе не сопровождается никакими толчками или колебаніями вагоновъ. Представимъ себѣ, что мы находимся въ вагонѣ ночью, что окна закрыты, и никакихъ внѣшнихъ предметовъ мы поэтому наблюдать не можемъ. Въ такомъ случаѣ совершенно невозможно рѣшить, въ покоѣ ли вагонъ, въ которомъ мы находимся, или же онъ движется прямолинейно съ постоянной скоростью. Зато нами были бы замѣчены всѣ измѣненія въ движеніи. Измѣненія направленія пути мы замѣтили бы по центробѣжной силѣ, отклоняющей всѣ предметы и пассажировъ въ вагонѣ къ наружной сторонѣ траекторіи. Измѣривъ силу P , дѣйствующую на определенное тѣло массы m , можно даже вычислить произведеніе изъ абсолютной скорости v поѣзда на угловую скорость ω , съ которою онъ вращается вокругъ центра кривой. Дѣйствительно, механика даетъ намъ для центробѣжной силы P выраженіе $P = m \cdot v \cdot \omega$; слѣдовательно, $v \cdot \omega = \frac{P}{m}$. Далѣе, по направленію силы мы узнаемъ направленіе радіуса кривизны кривой, и мы можемъ такимъ образомъ установить, въ какомъ направленіи лежитъ точка, вокругъ которой происходитъ вращеніе. Но не существуетъ метода для определенія сомножителей v и ω въ отдѣльности или разстоянія до центра вращенія. Итакъ, хотя здѣсь мы, какъ и для земли, можемъ съ несомнѣнностью убѣдиться въ наличности вращательнаго движенія безъ помощи какихъ-либо внѣшнихъ объектовъ, однако, для его полнаго определенія недостаетъ всегда одной величины, которой нельзя найти. Аналогично этому, всякое измѣненіе величины скорости поѣзда можно было бы замѣтить по силамъ реакціи инертныхъ массъ въ вагонѣ. При замедленіи хода поѣзда каждое тѣло испытываетъ реакцію, направленную впередъ, при ускореніи — направленную назадъ. Такимъ образомъ можно было бы опредѣлить знакъ измѣненія движенія, а величину измѣненія движенія мы найдемъ, измѣряя силу P , дѣйствующую на тѣло извѣстной массы m . Но движеніе при этомъ все же остается неизвѣстнымъ, если не принять его за данное хотя бы для одного определеннаго момента. Если положить его равнымъ нулю на одной изъ станцій, то этимъ мы введемъ уже въ область разсмотрѣнія внѣшній міръ.

Земля является тѣмъ кораблемъ, на которомъ мы несемъ по міровому пространству. При этомъ путешествіи мы можемъ, какъ и въ желѣзнодорожномъ вагонѣ, посредствомъ наблюдений на нашемъ кораблѣ замѣтить всѣ измѣненія скорости движенія и его направленія; но мы никакъ не можемъ опредѣлить самой скорости движенія. Для этой цѣли намъ нужно было бы принять за неподвижное какое-либо тѣло внѣ земли, по которому мы могли бы ориентироваться. Пока мы имѣемъ дѣло только съ движеніями внутри нашей планетной системы, мы принимаемъ за неподвижную точку центръ солнца или, точнѣе, центръ тяжести планетной системы, и къ нему относимъ всѣ движенія. Но если ввести въ область разсмотрѣнія весь міръ неподвижныхъ звѣздъ, то мы не имѣемъ никакого права отдавать предпочтеніе нашему солнцу, и приходится тогда выбирать иную основную точку,—напримѣръ, центръ тяжести всей системы неподвижныхъ звѣздъ. При этомъ мы всегда дѣйствуемъ до нѣкоторой степени произвольно.

Невозможно опредѣлить движеніе относительно ээира съ такой же однозначностью, съ какою опредѣляется, напримѣръ, движеніе корабля относительно воды въ морѣ. Для полнаго опредѣленія движенія необходимо принять нѣкоторое произвольно выбранное матеріальное тѣло за основное тѣло для сравненія и считать его въ произвольно выбранный моментъ покоющимся въ ээирѣ. Для этого момента движенія всѣхъ другихъ тѣлъ міра относительно основного тѣла могутъ быть разсматриваемы и какъ движенія ихъ въ ээирѣ. Движенія же ихъ во всѣ послѣдующіе моменты можно будетъ опредѣлить посредствомъ абсолютныхъ измѣреній, такъ какъ каждое измѣненіе движенія въ ээирѣ можетъ быть обнаружено и количественно измѣрено по реакціямъ инерціи.

Это предложеніе называется теоремой относительности въ механикѣ, такъ какъ, согласно этому предложенію, движеніе матеріи является до извѣстной степени относительнымъ.

ОТНОСИТЕЛЬНОСТЬ ДВИЖЕНІЙ ВЪ УЧЕНИИ ОБЪ ЭЛЕКТРИЧЕСТВѢ.

450. Теорема относительности не ограничивается только силовыми дѣйствіями ээира, воспринимаемыми нами, какъ сопротивленія

инерціи, но имѣеть совершенно общее значеніе. Мы не можемъ отличить дѣйствія магнитнаго поля на движущіяся вмѣстѣ съ проволокю электрическія частички (іоны или электроны) отъ дѣйствія электрическаго поля, возникающаго при движеніи того же магнитнаго поля, на покоющіяся электрическія частички проволоки, пока мы ограничиваемся наблюденіемъ индуктированнаго напряжения (§ 303). Относительность движений, отъ которыхъ зависитъ индуктированное напряжение, имѣеть столь же общій характеръ, какъ и относительность движений въ чисто геометрическомъ смыслѣ. Въ самомъ дѣлѣ, если двигать катушку и магнитный стержень, неизмѣнно связанные между собою, то ни въ какомъ случаѣ не получается индукціоннаго дѣйствія, совершенно независимо отъ того, постоянно или перемѣннымъ, прямолинейнымъ или вращательнымъ является абсолютное движеніе тѣль, неподвижныхъ другъ относительно друга. Эта далеко идущая относительность основана, главнымъ образомъ, на томъ, что при индукціонныхъ дѣйствіяхъ мы не наблюдаемъ поля точку за точкой, но измѣряемъ лишь линейную сумму его силового дѣйствія на іоны вдоль замкнутой кривой, да и ту не въ каждый отдѣльный моментъ: въ виду инертности всѣхъ измѣрительныхъ инструментовъ, не исключая и струннаго гальванометра, мы измѣряемъ лишь суммы по времени для интерваловъ, по крайней мѣрѣ, въ 0,001 секунды или еще бѣльшихъ. Если бы возможно было изслѣдовать поля въ каждый моментъ точку за точкой, то и по теоріи Максвелла можно было бы предвидѣть относительность, но только въ томъ объемѣ, въ какомъ ее знаетъ механика.

Это легко выяснитъ на простомъ примѣрѣ. Представимъ себѣ магнитный стержень, движущійся въ направленіи своей оси съ постоянной скоростью. На рис. 215 представлены силовыя линіи электрическаго поля, окружающаго такой магнитъ. Эти линіи даютъ величину и направленіе силы, дѣйствующей на покоющійся въ пространствѣ электронъ, мимо котораго движется стержень; онѣ повсюду расположены перпендикулярно къ направленію магнитныхъ силовыхъ линій. Представимъ себѣ, во-вторыхъ, что магнитный стержень находится въ покоѣ, а параллельно его оси движется электронъ съ такою скоростью, съ какою въ первомъ случаѣ стержень двигался мимо электрона. Теперь электрическаго поля нѣтъ, но движущійся электронъ въ магнитномъ полѣ испытываетъ силовое дѣйствіе одинаковаго направленія (перпендикулярно къ магнитнымъ си-

ловымъ линиямъ) и одинаковой величины съ силовымъ дѣйствіемъ, испытываемымъ покоющимся электрономъ въ электрическомъ полѣ движущагося стержня.

Представимъ себѣ теперь, что магнитный стержень и электронъ движутся другъ относительно друга прямолинейно, но съ переменнѣй скоростью. Если магнитъ находится въ покоѣ, а электронъ движется, то силовое дѣйствіе вычисляется совершенно такимъ же образомъ, какъ и въ случаѣ постоянной скорости, а именно оно равно произведенію изъ скорости въ данный моментъ на слагающую магнитнаго поля, перпендикулярную къ ея направленію, въ той точкѣ, черезъ которую проходитъ электронъ, и на зарядъ электрона. Если же электронъ неподвиженъ, а магнитный стержень движется, то получается нѣсколько иная сила. Электрическое поле вокругъ движущагося стержня, вслѣдствіе конечной скорости распространенія всѣхъ электромагнитныхъ дѣйствій, не можетъ развиваться мгновенно во всемъ пространствѣ. Оно возникаетъ сначала непосредственно у поверхности движущагося магнита и отсюда распространяется по всему пространству съ огромной скоростью, такъ какъ величина c имѣетъ огромное значеніе $3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см.}}{\text{сек.}}$. Если магнитный стержень движется съ непостоянной скоростью, то въ нѣкоторомъ разстояніи отъ него сопровождающее его электрическое поле имѣетъ значеніе, соотвѣтствующее значенію скорости стержня въ весьма близкій предшествующій моментъ. Вслѣдствіе этого, если скорость увеличивается, то дѣйствующая на электронъ сила будетъ нѣсколько меньше той, которая соотвѣтствовала бы скорости въ данный моментъ; если же скорость убываетъ, то сила нѣсколько больше. Сила, дѣйствующая на покоющійся электронъ въ полѣ движущагося магнита, относится къ силѣ, дѣйствующей на движущійся электронъ въ полѣ покоющагося магнита, — если относительная скорость въ обоихъ случаяхъ одна и та же, — такъ, какъ если бы измѣненія скорости при движеніи магнита всегда наступали нѣсколько позже, чѣмъ при движеніи электрона.

Кажущаяся „разность фазъ“ между скоростями въ обоихъ случаяхъ, понятно, очень мала въ виду очень большого значенія величины $c = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{см.}}{\text{сек.}}$ и не можетъ быть обнаружена обычными измѣрительными инструментами, обладающими относительно большой инерціей.

Если магнитный стержень вращать около оси, перпендикулярной къ его длинѣ и проходящей черезъ его центръ тяжести, то вокругъ стержня образуется электрическое поле, переносящее магнитныя дѣйствія и вращающееся вмѣстѣ со стержнемъ. Распределение этого поля въ плоскости, проходящей черезъ магнитный стержень и ось вращения, представлено приблизительно на рис. 357. Если магнитный стержень неподвиженъ, а электроны движутся по окружностямъ, центры которыхъ лежатъ на прямой, служившей раньше осью вращения, то эти электроны испытываютъ силовыя дѣйствія, направление и величина которыхъ опредѣляются направлениемъ и толщиной линий, изображенныхъ на рисункѣ 358 специально для плоскости, проходящей черезъ магнитный стержень и ось вращения.

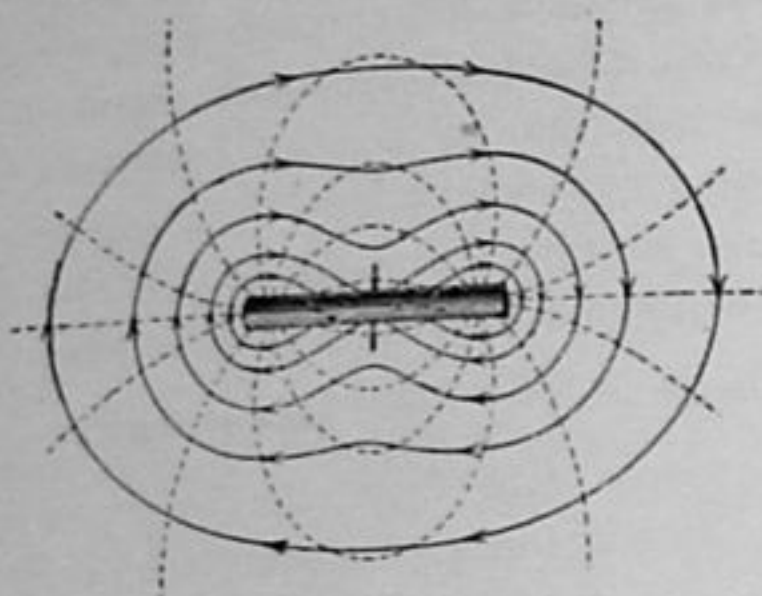


Рис. 357. Электрическое поле вокругъ магнитнаго стержня, вращающагося около перпендикулярной къ нему оси.

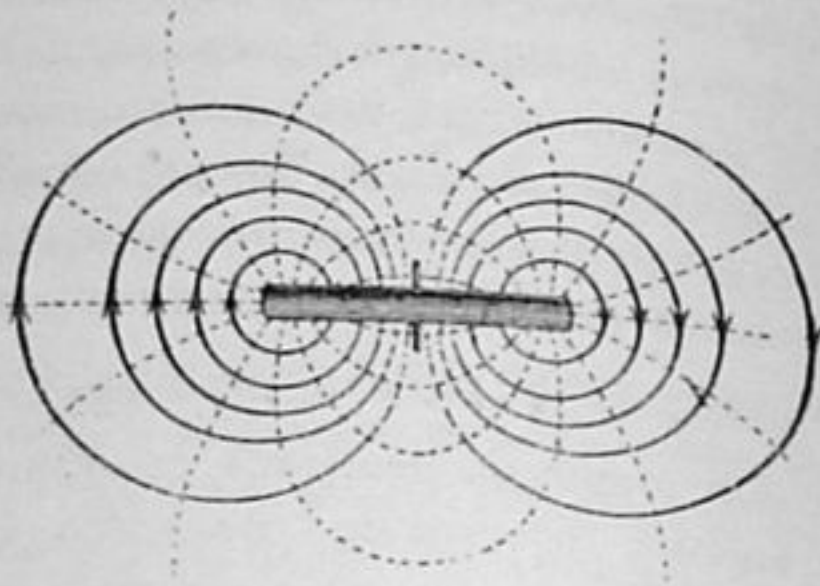


Рис. 358. Силовое дѣйствіе на электроны, движущіеся по окружностямъ около оси, перпендикулярной къ длинѣ магнита.

Оба силовыя дѣйствія, представленныя на рисункахъ 357 и 358, связаны между собою однимъ закономъ. Если составить линейную сумму силы по одной и той же замкнутой кривой, то по рисунку 357 всегда получается та же величина, какъ и по рисунку 358; въ этомъ заключается теорема относительности индукціонныхъ дѣйствій. Но закономъ индукціи, который опредѣляетъ только значеніе линейной суммы электродвижущей силы вдоль замкнутыхъ кривыхъ, еще не вполне опредѣляется распределение силы въ отдѣльныхъ точкахъ поля. Для болѣе точнаго опредѣленія въ случаѣ электрическаго поля движущагося магнита должно быть еще соблюдено условіе: силовыя линіи поля не могутъ возникать и заканчиваться въ эфирѣ (§ 57). Силовое же дѣйствіе магнитнаго поля на движу-

щийся электронъ должно быть перпендикулярно къ магнитнымъ силовымъ линіямъ и къ направленію движенія (§ 289). Вообще говоря, эти два условія не совмѣстимы. Поэтому электрическое поле на рис. 357, вообще, не перпендикулярно къ магнитнымъ силовымъ линіямъ, а линіи силового дѣйствія, представленнаго на рис. 358, постепенно исчезаютъ, если идти въ томъ направленіи, въ которомъ находится ось вращенія.

Оба условія удовлетворяются одновременно въ представленномъ на рис. 215 полѣ магнита, движущагося прямолинейно съ постоянной скоростью. Это имѣетъ мѣсто не только въ томъ спеціальному случаѣ, который представленъ на этомъ рисункѣ, но во всѣхъ тѣхъ случаяхъ, когда магнитъ или проводникъ съ токомъ движется въ какомъ-либо направленіи съ постоянной скоростью, и притомъ только въ этихъ случаяхъ.

Если мы перемѣщаемъ въ эфирѣ въ опредѣленномъ направленіи матеріальную систему, содержащую магниты, провода съ токомъ и какія-либо заряженныя частицы, то силы, испытываемыя заряженными частицами вслѣдствіе постояннаго движенія въ магнитныхъ поляхъ и съ магнитными полями, всегда вполнѣ уравниваются силовымъ дѣйствіемъ электрическаго поля, сопровождающаго постоянное движеніе магнитнаго поля; поэтому въ системѣ наблюдаются только такія силы, которыя можно было бы точно такъ же замѣтить въ ней, если бы она находилась въ абсолютномъ покоѣ въ эфирѣ. Но если система движется ускоренно или криволинейно, то электродвижущія силы магнитнаго поля, дѣйствующія на заряженныя тѣла, не компенсируются электрическими силами, сопровождающими движущееся магнитное поле, какъ мы видѣли сейчасъ на двухъ примѣрахъ; въ подобныхъ случаяхъ должны быть возможны опыты, показывающіе, что при неравномѣрномъ движеніи внутреннія силы въ системѣ будутъ иныя, нежели при равномѣрномъ движеніи или покоѣ.

Посредствомъ наблюденія внутреннихъ электромагнитныхъ силъ въ матеріальной системѣ, состоящей изъ магнитовъ, проводниковъ съ токомъ и заряженныхъ тѣлъ, нѣтъ возможности установить, движется ли вся система съ какою-либо постоянною скоростью въ эфирѣ или же находится въ покоѣ. Зато всякое измѣненіе движенія по на-

Конечно, эти числа нельзя считать окончательнымъ подтвержденіемъ теоріи относительности. Однако, и новѣйшія измѣренія Бухерера (Bucherer) также подтвердили теорію Лоренца. Кроме того, Гупка (Hupka), измѣривъ одновременно катодное напряжение и магнитное отклоненіе для весьма быстрыхъ катодныхъ лучей, сравнилъ продольную массу съ поперечной и также нашелъ результаты, подтверждающіе формулы теоріи относительности. Слѣдуетъ замѣтить, однако, что эти двѣ работы встрѣтили возраженія, и поэтому мы не можемъ еще считать разрѣшенной задачу экспериментальнаго опредѣленія зависимости массы отъ скорости.

ВЕРХНІЙ ПРЕДѢЛЪ СКОРОСТИ.

462. Если въ формулы теоріи относительности подставляютъ значенія $\beta = v : c$, превышающія единицу, то вообще получаются мнимые результаты, какъ можно убѣдиться по всѣмъ формуламъ, приведеннымъ въ послѣднихъ параграфахъ. Эти формулы, слѣдовательно, не годятся для значеній β , большихъ единицы. Болѣе точное разсмотрѣніе этого вопроса приводитъ къ заключенію, что въ природѣ вообще невозможны значенія $\beta \geq 1$, такъ какъ, если скорость матеріальнаго тѣла могла бы достигнуть значенія $c = 3 \cdot 10^{10}$, то такое тѣло должно было бы превратиться въ настоящую математическую плоскость двухъ измѣреній, что, конечно, невозможно.

Согласно теоріи относительности, для скорости матеріальнаго тѣла существуетъ верхній предѣлъ, который никогда не можетъ быть достигнутъ. Этимъ верхнимъ предѣломъ является скорость свѣта $c = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{с.м.}}{\text{сек.}}$.

Если вспомнить, что, согласно теоріи относительности, нельзя опредѣлить абсолютной скорости тѣлъ въ міровомъ эфирѣ, то съ перваго взгляда предыдущее предложеніе кажется абсурднымъ. Существуютъ тѣла, — на примѣръ, частицы, излучаемыя радіемъ, — скорость которыхъ относительно земли немногимъ лишь меньше, чѣмъ скорость свѣта. Положимъ, что такая частица движется въ направленіи, совпадающемъ съ направленіемъ движенія земли въ міровомъ пространствѣ. Принципъ относительности позволяетъ намъ приписать скорости движенія земли сколь угодно большую величину, и можно было бы подумать, что для этой скорости можно выбрать столь большое значеніе, чтобы скорость частицы была гораздо больше, чѣмъ $3 \cdot 10^{10}$. Это заключеніе, однако, основывается на невѣрномъ

предположеніи, что большія скорости складываются такъ же, какъ и малыя. Это предположеніе невѣрно потому, что всѣ опредѣленія времени и длинъ, въ случаѣ справедливости принципа относительности, зависятъ отъ того, какія предположенія мы дѣлаемъ относительно абсолютныхъ движеній. Если продѣлать вычисленія вполне согласно съ принципами теоріи относительности, то и въ случаяхъ, подобныхъ только-что указанному, всегда получаются абсолютныя скорости, меньшія, чѣмъ скорость свѣта.

ОБЩЕЕ ЗНАЧЕНІЕ ПРИНЦИПА ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ.

463. Принципъ относительности замѣчателенъ тѣмъ, что онъ утверждаетъ существованіе внутренней связи между всѣми свойствами матеріи и всѣми физическими явленіями. Природа, повидимому, воспроизводитъ все богатство физическаго міра изъ небольшого числа простыхъ процессовъ въ одной міровой субстанціи, подобно тому какъ математика выводитъ необозримое множество интересныхъ истинъ изъ немногихъ основныхъ положеній — аксіомъ.
