

158
ПОСОБИЯ ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

В. К. ЛЕБЕДИНСКИЙ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО 1926

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО РСФСР
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

О. Д. ХВОЛЬСОН ПОЛНЫЙ КУРС ФИЗИКИ.

В пяти томах.

Том IV. Учение о магнитных и электрических явлениях. (Первая половина.) Изд. 3-е, перераб. и дополнен. Стр. 834. Ц. 5 р. 30 к., в папке 6 р. 30 к.

Том V. Учение о магнитных и электрических явлениях. (Вторая половина.) Изд. 2-е. Стр. 983. Ц. 6 р. 30 к., в папке 7 р. 30 к.

По подписке цена всего курса 25 р.

КРАТКИЙ КУРС ФИЗИКИ.

В пяти частях.

Часть IV. Учение о магнитных и электрических явлениях. (Первая половина.) Изд. 2-е. Стр. 424. Ц. 2 р. 60 к., в папке 3 р. 40 к.

Часть V. Учение о магнитных и электрических явлениях. (Вторая половина.) Изд. 2-е. Стр. 413. Ц. 2 р. 60 к., в папке 3 р. 40 к.

Проф. В. А. Михельсон.

ФИЗИКА.

Том II. Свет и электричество.

Стр. 424.

Изд. 2-е, дополненное.

Ц. 3 р. 50 к.

Депозитарий

ПОСОБИЯ ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

ПРОФ. В. К. ЛЕБЕДИНСКИЙ

3887

Пров. 1965

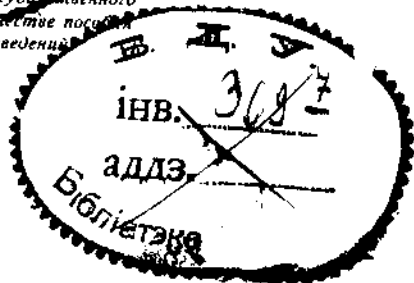
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

ИЗДАНИЕ

ИСПРАВЛЕННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

Научно-техническая секция Государственного
Ученого Совета Республики. Учебные пособия
для Высших Учебных Заведений

Получено

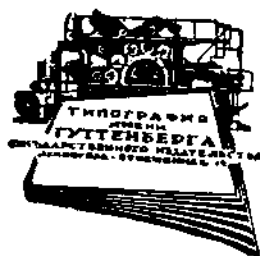


ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА — 1926 — ЛЕНИНГРАД

ПРОВЕРЕНО
1966 г.

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА

ИИДЭТИЗОНЭД



ПРЕДИСЛОВИЕ К ШЕСТОМУ ИЗДАНИЮ.

Это шестое издание учебника „Электричество и магнетизм“ сохраняет в себе тот общий план изложения, который был принят в первом издании (1909 г.). В этом плане на первое место выдвигается простейшее динамическое явление в мире электричества — постоянный ток по проводнику, — явление наиболее знакомое по своим приложениям каждому современному читателю, особенно если он живет в городе. Затем следуют статические явления, для понимания которых требуется уже известный навык в подходах к вопросам электричества. Все изложение связано энергетическими представлениями.

Электронная теория, не довольствуясь одними этими представлениями, направленная к раскрытию внутреннего механизма явлений, отнесена к концу изложения.

В этой книге автор задается целью представить, по возможности полно и сжато, все многообразие применений электрической энергии и все богатство тех мыслей, которые возбуждаются электрическими явлениями в умах людей. Книга должна, по идее автора, служить введением в эту громадную область знания, тесно связанного с современной жизнью. После такого введения читатель, сознавая уже общее, может обратиться по другим книгам к деталям в том или другом направлении.

Изложение доводится до известной точности, до известной математичности, чтобы не оставить читателя без представления о той великой математической обработке, которой достигло наше знание об электрических явлениях и из которой рождаются удивительнейшие применения.

К настоящему изданию все изложение подверглось коренному пересмотру. При переработке большую помощь оказали автору различные замечания учеников и те результаты, которые обнаружались после их занятий по прежним изданиям. Особенно много

в процессе этой переработки было сделано студентом М. Лебединским.

В читателе предполагаются сведения по элементарной математике. Попытки изложить более элементарно начатки по электричеству были сделаны автором в его брошюрах: „Электричество и его служба человечеству“ (изд. 1918, 1922 и 1926 гг.) и „Электричество в радио“ (изд. 1924 и 1925 гг.).

Автор.

Июнь 1925 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

стр.

Предисловие	3

Глава I. Основные понятия. Энергия электрического тока 9

Энергия 9. — Работа 10. — Рассеяние энергии 12. — Полезное действие 15. — Мощность 15. — Напряжение энергии 17. — Электрическая энергия 18. — Электрический ток 21. — Электрическая цепь; генератор 22. — Энергия тока. Практическая система единиц 25. — Измерение количества электричества; величина (сила) тока 26. — Другое выражение энергии тока; мощность тока 28. — Падение потенциала; отдача генератора 29. — Способы соединения генераторов 31. — Заключение 32. — Примеры 33.

Глава II. Закон Ома 35

Закон Ома 35. — Закон Джоуля-Ленца; другое выражение для полезного действия генератора 36. — Электрическое сопротивление. Практическая ед. сопротивления 38. — Последовательное соединение сопротивлений; реостаты 40. — Внешнее и внутреннее падение потенциала; наибольшая работа элемента 41. — Разветвление тока. Эквивалентное сопротивление 44. — Потенциометрический метод 46. — Мост Витстона 48. — Заключение 49. — Примеры 50.

Глава III. Применение джоулева тепла. Устройство сети 52

Электрическая грелка 52. — Лампа накаливания 53. — Вольтова дуга 55. — Тепловые измерительные приборы 56. — Включение амперметра и вольтметра 57. — Измерение E_1 , E и E_2 помощью вольтметра 58. — Электрическая сеть 58. — Распределение энергии 59. — Колебания в нагрузке 61. — Различные приспособления 62. — Примеры 63.

Глава IV. Магнитное поле 65

Основные магнитные явления 65. — Количество магнетизма; закон Кулона 66. — Единица магнетизма; система CGS 67. — Магнитное поле

напряжение поля 68. — Магнитный поток; магнитная проницаемость 72. — Глубокое значение теории магнитного потока. Поток индукции и силовой поток 77. — Намагничивание 80. — Земной магнетизм 82. — Из истории науки о магнетизме 83.

Глава V. Электромагнитная сила 89

Основные явления 89. — Поле вокруг тока 92. — Закон Лапласа 93. — Круговой проводник 95. — Тангенс-гальванометр 96. — Ошибки тангенс-гальванометра 98. — CGS-ная единица величины тока; отношение между практическими и CGS-ными единицами 99. — Соленоид 101. — Электромагнит. Магнито-движущая сила. 102. — Действие магнитного поля на проводник с током 104. — Закон действия поля на ток 106. — Взаимодействие токов 107. — Электромагнитные измерительные приборы 109. — Пример 113.

Глава VI. Электромагнитная индукция 114

Электромагнитная индукция 114. — Открытие индуктированного тока 114. — Энергия индуктированного тока; направление его. Закон Ленца 116. — Основной случай электромагнитной индукции 116. — Закон, выражающий индуктированную эдс 117. — Динамомашин и электродвигатель 119. — Примеры 122. — Индукционная катушка. Общее выражение закона Ленца 123. — Взаимная индукция 124. — Самоиндукция. Кинетическая энергия тока. Супрапроводники 126. — Роль самоиндукции в индукционной катушке 129. — Токи Фуко 130. — Магнитные успокоители 131. — Магнетониндукция и вольтаниндукция 131.

Глава VII. Динамомашин и электродвигатель постоянного тока 137

Якорь 137. — Способы возбуждения 137. — Выражение эдс 139. — Коллектор; сдвиг щеток 141. — Регулировка динамомашин 143. — Полезное действие динамомашин 146. — Электродвигатель постоянного тока 147. — Обратная эдс 148. — Включение электродвигателя. Скорость вращения 149. — Определение коэффициента полезного действия электродвигателя 151. — Примеры 152.

Глава VIII. Электрохимические явления. Элементы 154

Электролит 154. — Обратная эдс вольтметра 154. — Практические применения 155. — Законы Фарадея 156. — Гальванический элемент 156. — Контактная разность потенциалов 157. — Поляризация элемента 158. — Элементы без поляризации 158. — Аккумуляторы 161. — Примеры 163.

СТР.

Глава IX. Электростатика 165

Статическая единица электричества 165. — Принцип сохранения электричества 167. — Унитарная теория 169. — Конденсатор; электрическое поле 170. — Диэлектрическая постоянная 172. — Работа конденсатора 173. — Разность потенциалов; емкость. Напряжение электрического поля. Энергия конденсатора 174. — Эл.-ст. единица разности потенциалов 178. — Статическая работа генератора 178. — Статические приборы 180. — Уединенный заряд; земля 181. — Индукция в разомкнутой цепи 183. — Баллистический отсчет 185.

Глава X. Историческое развитие понятия об электрическом токе 188

Древняя электростатика 188. — Тихий разряд 189. — Гальванизм 190. — Электричество статическое и ток 192. — Как связать электричество статическое и ток? Современное учение 194.

Глава XI. Сеть переменного тока 198

Генератор переменного тока 198. — Применение альтернаторов 199. — Передача энергии переменным током; трансформатор 200. — Измерительные приборы 202. — Особые явления, характеризующие сеть переменного тока 203. — Гистерезис 206. — Геометрический способ изображения 206. — Полное сопротивление 208. — Фазовый угол 210. — Нагрузка трансформатора 211. — Электрификация 212.

Глава XII. Электрические колебания и электромагнитные волны 214

Сила упругости 214. — Гармонические колебания 215. — Сохранение амплитуды 215. — Постоянство периода 217. — Затухание 217. — Излучение 218. — Резонанс 219. — Стоячие волны 221. — Стоячие волны в вибраторе 223. — Электрические колебания 223. — Период электрических колебаний 225. — Простой способ демонстраций 226. — Электромагнитное излучение 227. — Электромагнитная теория света 227. — Электромагнитные волны; токн смещения 230. — Применение электромагнитных волн 233. — Основная схема радиопередачи. Радиотелеграф 236. — Прием на телефон 239. — Незатухающие колебания 243. — Радиотелефон 246. — Измерение токов большой частоты и очень малой амплитуды 248.

Глава XIII. Электронная теория 250

Электронная теория 250. — Катодный поток 252. — Вещественный луч; электрон 253. — Величины $\frac{e}{m}$ и u 254. — Газ становится проводником. Ионизация 258. — Атомность электричества 262. — Возникновение X-лучей 264. — Фотоэффект 267. Свечение атома 271. — Строение атома 272. —

Радиоактивность 277. — Положительные лучи 279. — Металлическая проводимость 280. — Принцип сохранения электричества 283. — Контактная разность потенциалов 284. — Магниты 284. — Масса и скорость 285. — Добавление об индукции токов 286. — Электрон в технике. Катодное реле. Катодный осциллограф. Триод. Искра и вольтова дуга 287.

Глава XIV. Система электрических измерений 294

Три системы измерений 294. — Практическая и эл.-магн. CGS системы 294. — Эл.-статическая и эл.-магнитная системы 296. — Размерности 297. — Соединение обеих систем в одну 298. — Скорость света 299. — Таблица единиц 300.

Указатель 301

ГЛАВА I.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.

1. **Энергия.** Когда мы знакомимся с каким-либо физическим явлением, пред нами выступает „энергия“. Эта физическая энергия под разными своими видами или формами проникает все явления, управляет ими, направляет их, везде выказывая все одни и те же свои свойства.

Рассматривая явления с точки зрения энергии, учитывая в них ее игру, мы легче всего осваиваемся с ними, потому что при таком рассмотрении мы всегда видим одно и то же: вечные свойства физической энергии — сохранение энергии и рассеяние энергии.

Таким „энергетическим“ методом мы начнем и наше изложение учения об электричестве; поэтому необходимо здесь же, в 1-ой главе, перечислить те основные свойства энергии, которые дальше будут постоянно повторяться перед нами.

Было уже упомянуто слово „формы энергии“; их много и они очень, можно сказать — чрезвычайно различны; человек поднялся на гору — придал себе потенциальную энергию; дует ветер — это воздух, обладающий кинетическою формою энергии; стало светло — все вокруг наполнилось световою энергиею; становится жарко — накапливается тепловая форма; комната наполнилась звуками — это звуковая энергия; разложили воду — появилась избыточная химическая энергия в энергичных химических элементах, водороде и кислороде, обладающих большею энергиею, чем вода, из которой они произошли.

Это всё одна и та же энергия в разных формах; как они ни различны, по своему существу они одно и то же: энергия; и эти формы могут быстро и разнообразно меняться, когда происходит „преобразование“ энергии; произведем бурное соединение водорода с кислородом; появится звук, свет, сильное нагревание, предметы получат быстрое движение, в частном случае — полетят, например,

вверх, это образуется вода, т.-е. избыточная химическая энергия, бывшая в свободных элементах, водороде и кислороде, исчезает.

И так всегда при преобразовании энергии; какая-нибудь форма исчезает и ее заменяет другая (или другие). Но при этом сколько ее исчезает, столько же и появляется в новой форме. Это количественное соотношение нами будет постоянно руководить. Его называют „законом сохранения энергии“.

Говоря о преобразовании энергии, мы всегда имеем в виду целую цепь, путь ее преобразования; видя движущийся поезд, мы соображаем, что в паровозе тепловая энергия превращается в кинетическую, происходя сама из химической энергии угля; а эта последняя запасаена была в самые отдаленные времена живым деревом, когда оно поглощало лучи солнца; лучистая же энергия Солнца является результатом превращения на Солнце другой какой-то, „солнечной“ энергии в свет; откуда берется солнечная энергия — это уже космический вопрос, на который еще нет окончательного ответа.

Мы видим, как широко и по времени, и по пространству захватывает явление преобразования энергии; как обобщается весь мир с его прошлым, настоящим и будущим преобразовывающеюся энергией.

Чтобы производить учет энергии, чтобы знать, сколько получим энергии в каком-либо виде, или сколько потратим ее в другом, необходимо уметь измерять ее во всякой форме; и, разумеется, наиболее правильно измерять ее всегда в одной и той же единице измерения, так как все формы энергии по существу своему — одно и то же.

2. Работа. Для такого однообразного подсчета столь разнообразных форм энергии мы пользуемся тем ближайшим для нас признаком энергии вообще, который выражается в самом слове: энергия. Это есть способность к совершению работы. Предмет совершает работу, если и поскольку обладает энергией; при этом он лишается своей энергии в количестве, соответствующем совершаемой работе. Но энергия не пропадает; следовательно, в том теле, над которым совершается работа, появляется энергия, опять-таки соответствующая совершенной работе, т.-е. равная той энергии, которой лишился работавший предмет (работник, машина).

Работа и есть переход энергии, могущий быть в то же время и ее преобразованием, если изменяется ее форма. Количество работы измеряет энергию, участвующую в явлении как ту, которая исчезает, так и ту, которая появляется.

Человек поднял по вертикальному направлению груз в несколько (P) килограммов на высоту нескольких (H) метров. По определению того, что такое работа, он совершил

$P \cdot H$ килограммометров;

следовательно, этот работник потратил энергию в $P \cdot H$ кг/м и такую же энергию получили те P кг, над которыми была совершена работа, поднятые на высоту H ; их энергия, значит, увеличилась на $P \cdot H$ кг/м: здесь энергия человека пошла на потенциальную энергию поднятого тела.

Если человек протаскил на длину H м (по горизонтальному пути) груз, прикладывая к нему, чтобы победить трение, горизонтальную силу в P кг, он опять совершил $P \cdot H$ кг/м; здесь его энергия перешла в тепло, развивающееся при трении.

Наконец, можно бросить предмет в горизонтальном направлении, сообщив ему, ускоряя его, кинетическую энергию; осуществить это можно, например, прилагая силу P кг на расстоянии H м; здесь опять совершается работа в $P \cdot H$ кг/м, и энергия бросавшего переходит в кинетическую того предмета, над которым совершена работа.

Говоря языком механики, можно сказать, что предыдущие три случая исчерпывают все случаи работы: 1) работа на поднятие (на потенциальную энергию), 2) работа на трение, 3) работа на ускорение; все три случая могут происходить и совместно, в разных комбинациях, и даже, можно сказать, никогда на земле не происходит в точном виде в отдельности.

Не всегда так ясно бывает различение работающего и того, над чем производится работа. Например, падает камень; его потенциальная энергия обращается в его же кинетическую (трением пренебрегаем); он работает сам над собою.

Рассуждение будет правильнее если принять во внимание и землю, рассматривая всю систему: земля и камень; при падении камня потенциальная энергия этой системы убывает (земля, строго говоря, тоже падает на камень), а кинетическая возрастает.

Точно также при всплывании дерева на поверхность воды мы должны рассматривать систему, состоящую из воды, земли и дерева; при всплывании общая потенциальная энергия уменьшается, так как более легкое тело (дерево) становится дальше от земли, а зато более тяжелое тело (вода) занимает его место; если более тяжелое тело, находящееся на высоте, подменим более легким, потенциальная энергия убудет.

Точно также, когда атомы водорода и кислорода стремятся друг к другу, образуя воду, их общая химическая (потенциальная) энергия убывает, преобразуясь в другие виды в той же системе.

Килограммометр обычная единица энергии и работы; но, строго говоря, она неудобна тем, что основывается на килограмме — весовой единице; при ней усилие работающего сравнивается с весом, а вес всякой гири зависит от широты места и высоты его над уровнем океана. Точное определение того, что такое килограмм должно заключать в себе эти географические данные. Существует единица силы, определяемая теоретически, не как вес; она называется *диной*; работа одной дины на длине одного сантиметра называется *эргом*. Этот эрг и является основной единицей работы и энергии. Он неудобен по своей малости; но нередко нам придется пользоваться эргом; поэтому полезно всегда помнить отношение *эрга* к *кг·м*, а именно:

$$1 \text{ кг} \cdot \text{м} = 10^8 \text{ эргов}$$

с точностью до $2\frac{1}{3}\%$; при такой точности не стоит, конечно, упоминать, при каких географических условиях разумеется здесь килограмм, так как они изменяют его величину на доли %.

Тепловая энергия удобно измеряется в *калориях*. Найдено, что

$$1 \text{ мал. калория} = 4,184 \cdot 10^7 \text{ эргов.}$$

Калория, как и эрг, представляются совершенно постоянными величинами, обе независимыми, например, от широты места, а потому число, показывающее, сколько эргов в малой калории, есть некоторое математически определенное число; но мы его знаем из опыта, всегда с известным приближением. Здесь дано число, полученное из новейших, наиболее точных измерений.

3. Рассеяние энергии. Работа, как признак присутствия энергии, который позволил нам так просто вывести, что энергия измеряется эргами или килограммометрами, и который мы назвали ближайшим нам, нашему разумению, этот признак расплывается в какой-то призрак при ближайшем рассмотрении.

Хорошо говорить о работе и о способности к работе, когда пред нами работающий и предмет работы (обрабатываемый); еще лучше, когда нам ясна цель работы; такая работа может считаться назначением, смыслом существования. Так работают наши машины. Но с физической точки зрения, во-первых, всякое ничтожное явление, каждое движение ветки дерева или ее листика есть работа и результат работы. Во-вторых, как мы видели выше, в окружающих

явлениях не всегда так легко различить, что работает и над чем работает. Энергия превращается, работа совершается вообще в целой системе, во всем мире.

Представив весь мир, как целое, в котором совершаются явления, мы совсем уже не будем в состоянии различать работу, так как это нам „ближе всего“, именно потому, что понятие работы слишком человечно, слишком близко к нам. Что же в таком случае, если не совершение работы, увидим мы под преобразованием энергии.

Мы увидим здесь второй закон, которому подчинена физическая энергия, или Второе Начало энергетики.

Оно заключается прежде всего в следующем: все многообразные формы энергии неравнозначны в природе; они неодинаково просты, устойчивы; неодинаково обычны, банальны. Наиболее устойчивою формою энергии является тепло; все остальные виды энергии рано или поздно, естественным ходом физических событий непосредственно целиком или по частям — в целой цепи преобразований, переходят именно в тепло; поэтому оно и оказывается наиболее обычной формою энергии; а вследствие своей малой способности к преобразованию — наиболее мертвой, наименее ценной.

Здесь мы делили все формы энергии на две категории — тепло, с одной стороны, и все остальные — с другой; всё — от таинственной химической и электрической энергии до простой и ясной кинетической энергии, например, шара, пущенного катиться по столу.

Следует ли как-нибудь подразделять вторую категорию, мы определенно не знаем; мы будем иметь случаи убеждаться в особенности электрической формы.

Пока мы запомним только, что всякая форма энергии может нацело перейти и, в конце концов, переходит в тепловую, тогда как тепло лишь при предельных условиях (абсолютного нуля в холодильнике), недостижимых практикою, может преобразоваться целиком в какую-либо иную форму энергии.

Этим не исчерпывается весь смысл Второго Начала.

Тепло представляет собою такую форму энергии, которая неминуемо распределяется, расплзается по всем окружающим телам до равенства своего напряжения, т.-е. температуры во всех телах. Камень, поднятый на гору, выстроенное здание (потенциальная энергия кирпичей), заведенные часы — все это местные накопления энергии, остающиеся на своих местах до своего превращения. Тепло же расходуется, и мы не знаем ни одного вещества, которое было бы тепловым изолятором, т.-е. не обладало бы теплопроводностью, не уча-

ствовало бы в движении тепла от большей температуры к меньшей. Только абсолютная пустота изолирует в этом смысле нагретое тело, т.е. не допускает уход тепла с тела помощью теплопроводности.

Движение тепла теплопроводностью происходит по точно определенному закону: оно происходит тем быстрее, чем больше разность температур $T_1 - T_2$ между местом накопления тепла и тем, куда это тепло проводится; чем больше сечение s теплопроводящего тела и чем короче путь l тепла, т.е. чем ближе тела с этими разными температурами.

Закон этот выражается математически:

$$\frac{W}{t} = ks \frac{T_1 - T_2}{l},$$

где W/t обозначает скорость движения тепловой энергии, а k представляет так называемый коэффициент теплопроводности. Буквою W будем всегда обозначать работу или энергию.

Движение тепла, выравнивание температур происходит тем быстрее, чем резче по месту и по температуре накопление тепла; с уменьшением резкости процесс становится все медленнее; но прекратится он только тогда, когда во всем мире будет одна и та же температура. Эта температура будет, вероятно, что-нибудь около абсолютного нуля, потому что, если мы все мировые накопления тепла вообразим себе отдавшими свое тепло всему миру, то результатом будет повсюду бесконечно малое тепловое напряжение.

Такой процесс называется рассеянием энергии; когда он закончился, энергия в точности сохранилась, согласно закону своего сохранения, но имеется везде в малых крупицах, неощутимых физически.

Следовательно, именно к *рассеянию* энергии ведет всякое превращение какой-либо формы энергии в тепло; и такие свойства тел, как трение, вызывающее появление тепла, и теплопроводность, ведущая к его распределению, являются рассеивающими свойствами. И, наконец, излучение, лучистая энергия, свет от Солнца и вообще от всех тел (тела не излучают только, когда окружены телами с тою же температурой) — все это мощные факторы всеобщего рассеяния энергии; при чем свет в виде теплового излучения рассеивает тепло и вызывает выравнивание температуры также и через абсолютную пустоту и даже лучше, чем через какие-либо тела.

Рассеяние энергии является истинным смыслом всего, что происходит нового в природе всякого излучения и всякого преобразования энергии в тепло.

4. Полезное действие. Если работа машины имеет целью преобразование какой-либо энергии в тепло, то это преобразование может происходить нацело, и в этом смысле полезное действие машины может быть названо полным, или равным 100%. Но никогда не бывает, чтобы все тепло грелки шло как раз в тот предмет, который нагревают; часть тепла рассеивается, не достигая этого предмета; если назовем полезную часть тепла w , а все количество тепла, выработанное машиною (грелкою), W , то отношение

$$\frac{w}{W} \cdot 100\%$$

выражает коэффициент полезного действия (кпд) грелки.

Если машина преобразует какую-либо энергию A в другую форму B , обе не тепловые, например, потенциальную в кинетическую (гиря ведет часы), то всегда B меньше A ; разность $A - B = a$ выражает несовершенство машины, участие ее рассеивающих свойств, тепло, которое появляется при преобразовании вследствие трения. Кпд будет:

$$\frac{B}{A} \cdot 100\%.$$

Идеал техники в обоих вышеприведенных случаях свести рассеяние к нулю и довести кпд до 100%.

Если машина преобразует тепловую энергию в другую форму, то ни при каком самом совершенном устройстве машины кпд не может доходить до 100%; это противоречило бы принципу рассеяния, Второму Началу. Так как в реальных тепловых машинах, кроме этого, имеются еще рассеивающие свойства, то их кпд. всегда особенно мал, не превосходя 10—30%.

5. Мощность. Всякая машина может работать и более быстро, и более медленно, или, как говорят, с большею или меньшею мощностью.

Мощностью называется скорость работы, т.-е. количество $кг \cdot м$, вырабатываемое за единицу времени, например, в 1 сек. Она определяется делением работы (W) на число сек, за которые эта работа произведена. Мощность обозначается буквой P .

$$P = \frac{W}{t}.$$

Единицею мощности на практике часто считают 75 $кг \cdot м$ в сек («лошадиная сила»).

Одна и та же работа, например, 3000 кг/м может быть исполнена в короткое время, например, в 5 сек, при большой мощности (в данном случае $P = \frac{3000}{5 \cdot 75} = 8$ л. с.), или в более долгое время, например, 6 мин. 40 сек, при меньшей мощности (которая в нашем примере теперь $P = \frac{3000}{400 \cdot 75} = 0,1$ л. с.).

Работа в кг/м, выполненная при мощности P за время 1 сек, равна:

$$W = 75 \cdot P \cdot t \text{ кг/м,}$$

если P выражена в л. с.

Мощность всякой данной машины можно менять, но лишь в известных узких пределах. Заставляя машину работать при слишком малой мощности, ей несвойственной, мы понижаем ее КПД: ее части окажутся слишком великими, а также и ее рассеивающая способность; при слишком большой мощности машина будет работать с перенапряжением своих частей и может быть повреждена. Всякая машина рассчитана для некоторой определенной мощности, при которой она лучше всего работает и наиболее долго служит; эта мощность обыкновенно и обозначается на машине в л. с.

Таким образом мощность, а не работа (как могло бы показаться с первого взгляда), характеризует машину; по заданной мощности машину рассчитывают при проектировании или выбирают на складе.

Машина подает энергию в желаемой форме, преобразовывая ее из другой; эта первоначальная форма энергии (напр., энергии топлива) должна быть доставляема машине с быстротою, соответствующую мощности машины; поэтому, не только сама машина, например, паровая, должна быть рассчитана на известную мощность, но и питающие ее органы, в данном примере котлы с топками должны соответствовать той же мощности.

Совершенно так же происходит и в природе; всякий ветер, каждая река являются готовыми приспособлениями для питания соответствующих машин, как-то: ветрянок, турбин, наливных колес; и эти машины могут иметь ту максимальную мощность, которая соответствует этому питанию. Например, Ниагара может питать машины до 10⁶ л. с.; воды Кавказа и Урала — около 500 000 л. с. Очень крепкая лошадь приспособлена, как машина, своим питанием и своею конструкцией к мощности в 1 л. с.; человек — около $\frac{1}{10}$ — $\frac{1}{8}$ л. с. Средняя мощность солнечного света, падающего на землю на каждый кв см, расположенный поперек солнечных лучей, оказывается равной ок. 2 мал. калориям = $8,368 \cdot 10^7$ эргов в мин.

дисентом. В нашей формуле на стр. 14 градиент температуры представляется дробью: $\frac{T_1 - T_2}{l}$.

7. Электрическая энергия. Учение об электрическом токе представляет собою весьма стройную, образцовую научную разработку огромного количества явлений, наблюдаемых на опыте.

Эти явления нашли себе разнообразнейшие применения на практике, при чем в каждом частном случае, вследствие указанной стройности, законченности научного понимания, мы имеем возможность предвычислить результат практического применения с большою точностью.

Интересно ознакомиться с практическими применениями электричества, которыми мы окружены при современных условиях жизни; электричество проникает всюду, как какое-то необходимое звено при преобразованиях энергии, как вернейший способ при передаче энергии на большие расстояния и с большою скоростью, как лучший способ искусственного накопления энергии в больших количествах и с большим напряжением.

Интересно разобраться и в теории электричества; понять, какими способами, какими методами удалось охватить такой, казалось бы, труднейший для объяснения процесс, как электрический, в котором главною пружиною служит явление, скрытое от нас. Действительно, звук, издаваемый телом, свет, излучаемый светящимся предметом, нагретость какого-либо вещества — мы узнаем непосредственно; но — наэлектризовано ли тело (хотя бы, напр., мы сами), идет ли по какому-либо проводнику электрический ток — узнать это непосредственно для нас невозможно; мы узнаем, что эти явления имеют место лишь косвенно: около наэлектризованного тела могут быть заметны особые сияния, запах озона, наконец, оно обнаруживает механические воздействия на окружающие тела, воздействия иногда большой силы; проводник, по которому идет ток, нагревается, часто даже раскаляется и притом без того, чтобы мы ему сообщали тепло; он образует вокруг себя магнитное поле, которое действует на магниты, при чем силу этого действия можно сделать достаточно большою, чтобы воспользоваться, например, для передвижения нагруженных вагонов; в известных случаях он химически разлагается; приближая к нему другой проводник, можно заметить, что и в этом последнем возбуждается ток, или появляются заряды со всеми своими внешними действиями.

Эти то внешние действия и служат основой для понимания, понимания не-непосредственного, электрических процессов.

В современных терминах это можно выразить такими словами: электрическую энергию мы не ощущаем; но она удивительно способна к преобразованию, быстрому и полному превращению в другие формы энергии, как свет, тепло, механическое движение; эти превращения и суть внешние действия электрических заряда и тока, по которым мы и судим о них; этими же превращениями исключительно и пользуются в деле применений электричества; главный метод научного исследования и основная задача техники в мире электричества совпадают.

Природа так устроена, что электрическая энергия не только быстро и сполна превращается в другие формы, не только рассеивается или иссякает, но и *появляется* из разнообразнейших видов энергии, как механического, так и теплового и химического. Только то обстоятельство, что мы можем получать электрическую энергию, и позволяет пользоваться этим быстро рассеивающимся работником. Электротехник сам „получает электричество“, чтобы его, в большинстве случаев, немедленно же — расходовать.

Для науки это превращение различных процессов (видов энергии) в электрический является стимулом изучения внутренней стороны этих процессов, лежащих глубже того, что говорят нам наши ощущения; при современном состоянии физики мысль об электричестве является таким же постоянным мотивом в понимании света, тепла, движения и вообще в понимании физического мира, строения его из атомов, как электрическая энергия — неперенным звеном в цепи современных технических преобразований работы.

Все учение об электрическом токе распадается на пять частей: 1) Подсчет энергии электричества; 2) Закон Ома, позволяющий рассчитать величину тока и нагревание, производимое им, как в однородном проводнике, так и в самом сложном по своим разветвлениям; 3) Закон электромагнитной силы, позволяющий вычислить магнитные действия данного тока; крупнейшее приложение этой части — теория электродвигателей; 4) Закон электромагнитной индукции, т.е. получения тока помощью магнитных сил; сюда относится теория динамо-машин; 5) Законы электрохимических явлений.

Две последние части являются завершением всего нашего понимания электрического тока; из них вытекает электромагнитная теория света и электронная теория, которые уже выходят за пределы учения только об электричестве.

Во всех пяти частях изучается одно и то же — электрический ток; но расчленение этого явления, соответственно различным случаям преобразования энергии, совершенно необходимо; каждая из частей возникает из своего особого ряда опытных данных. В искусном разделении сложного явления и заключается первая черта научного метода исследования.

Но так как это разделение искусственно, то отдельные части переплетаются между собою по своему содержанию; поэтому очень часто бывает полезно не упускать из виду полного представления об электрическом токе, которое излагается всеми пятью частями. К этому и служит их перечисление в первой главе.

В настоящей главе даются те общие положения, без которых нельзя обойтись ни в какой части учения об электрическом токе. Поэтому ими нужно овладеть до наибольшей степени совершенства. Как ни общи эти понятия, они все же основываются на весьма простых истинах, что характеризует вообще современную науку.

Для понимания электрического тока совсем не нужно знать, что такое электричество. Некоторый ответ на этот вопрос будет дан в конце нашего курса; теперь же достаточно лишь сказать, что оно — не „предмет“, не тело, и потому мы никогда не будем в состоянии узнать электричество так, как знаем, например, золото.

Но необходимо понять, что электричество, находящееся в заряженном теле, например, в заряженной грозовой туче, связано с энергией, энергиею в скрытой форме, потенциальною. Эта энергия может быть вызвана к действию, превратиться в другую форму, если происходит разряд, т.-е. движение электричества из тучи, скажем, в землю. Искра (молния) (рис. 1), которая будет при этом разряде видна и слышна, которая раскаляет воздух, пробиваемый ею, несет с собою уже осязаемую энергию; источник этой энергии — потенциальная энергия, связанная с электрическим зарядом.

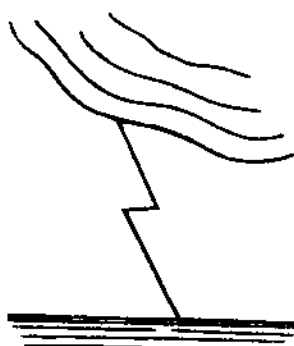


Рис. 1.

При разряде электричество не исчезает, не уменьшается в своем количестве. Это, конечно, трудно провредить, в случае разряда, потому, что и туча и земля — громадны, не охватываемые нашим опытом; проверка доступна — если небольшой заряженный предмет соединить с незаряженным; после разряда количество электричества

в обоих предметах оказывается в точности прежним, но энергия его будет меньше настолько, сколько ее пошло на явление искры.

Электричество в мире сохраняется; оно может быть лишь переносимо из одного места в другое при зарядке и возвращается обратно при разряде. Само собою понятно, что, если при разряде электричество отдает свою энергию, то при зарядке должна быть потрачена энергия, т.-е. совершена работа над электричеством, которому придается энергия.

8. Электрический ток. Заряженное тело разряжается, как бы оно хорошо ни было изолировано; энергия заряда стремится свестись к нулю или, по крайней мере, понизиться; все существующие изоляторы оказываются таковыми лишь относительно других тел; заряженное тело разрядится, если не сразу — через искру, то все же рано или поздно через воздух, незаметно; энергия заряда в этом случае перейдет в неощутимую ионизацию воздуха.

Но быстрее всего и нацело разряд происходит через проводник, например, металлический, идущий к земле. Эту то форму разряда мы и будем называть электрическим током. Он беззвучен и не светит; поэтому проволока, по которой идет ток, на вид ничем не отличается от другой, по которой тока не идет. В этом токе энергия электричества обращается в нагревание; в специальных случаях это нагревание доводит тела до накала (лампы накаливания); здесь можно, пожалуй, в непрямом смысле слов, сказать, что мы видим ток, и опытный глаз может даже, приближенно, судить о его величине по яркости света лампы.

Нагревание есть неперемнное следствие прохождения тока по проводнику, по закону рассеяния энергии (3 §), но не должно думать, даже и про этот случай тихого, незаметного разряда, что *вся* энергия работающего, т.-е. разряжающегося, электричества непременно идет только на нагревание: когда пустят ток в электродвигатель трамвая, вагон тотчас же задвигается и может получить очень большую живую силу, т.-е. чисто механическую энергию; работа, потребная на его движение против сил трения и, при подъемах, против силы тяжести, будет все время доставляться двигателем, пока в него идет ток. Точно также, если пустить ток через растворы, например, металлических солей, соли будут разлагаться, станет выделяться химически чистый металл; будет возрастать химическая энергия.

Возможность получения этих форм энергии при электрическом токе, возможность уменьшения нагревания от самого тока, ненужного,

например, для электродвигателя или при разложении соли, и заставляют считать электрическую энергию весьма ценною.

9. Электрическая цепь; генератор. Всякий предмет, в котором имеется электрическая энергия, от которого, значит, можно получить ток, называется генератором. Заряженная туча есть генератор; но как бы она велика ни была и как бы сильно она ни была заряжена, ток при ее разряде продолжается, говоря практически, мгновение. О таких мгновенных или быстропеременных (колебательных) токах мы будем говорить впоследствии; это явление весьма изменчиво и более сложно; большая часть нашего курса посвящается постоянному току, т. е. такому, который происходит непрерывно долгое время без заметного изменения.

В этом случае генератор должен непрерывно возобновлять свой заряд, непрерывно разряжающийся по проводнику; электричество, оставляющее генератор (G на рис. 2) через зажим, например, A , и идущее затем по проводнику ACB , в то же время восполняется электричеством, поступающим в генератор с проводника через второй зажим генератора B ; затем оно движется по самому генератору, который также должен быть проводником, к A и т. д. Таким образом электричество движется *всегда по замкнутому пути*, в данном

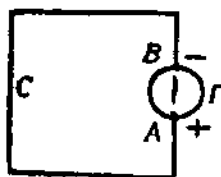


Рис. 2.

случае — замкнутому на самого себя проводнику, называемому электрической цепью. Размыкание, перерыв провода в одном каком-нибудь месте влечет за собою немедленное прекращение тока во всей цепи, как бы она длинна ни была; на этом основано действие наших обычных выключателей.

В одной точке (например, A , полюс положительный) генератора электричество имеет наибольшую энергию, в другой (отрицательный полюс B) — меньшую; туда поступает электричество, уже растратившее в проводнике большую часть своей энергии. Оно продолжает ее растрчивать до конца, двигаясь по генератору; но в то же время приобретает вновь прежний запас энергии; в этом заключается отличие генератора от остальной цепи, в которой энергия электричества только растрчивается. Такова основная схема цепи постоянного тока.

В виду того, что для возобновления электрической энергии нужно совершать работу, генератор, если он представляет собою динамо-машину, за все время своего действия должен, в свою очередь, находиться под действием двигателя, все время сообщаящего ему энергию, необходимую для указанной работы.

Таким образом, работа машины двигателя идет на повышение энергии электричества, а работою генератора, т.-е. его электричества, теряющего в токе по цепи свою энергию, и являются все действия тока в цепи.

Если генератором служит динамомашинa, ей сообщается механическая энергия от какого-нибудь двигателя, например, паровой машины, в которой сжигается уголь; здесь последовательность превращения энергии такова: химическая энергия угля — тепло — механическая энергия (движение поршня) — электрическая энергия. В случае генератора в виде элемента в нем самом имеется запас энергии в виде тел, готовых химически преобразоваться. Так, например, простейший элемент Вольты, состоящий из цинка и меди, опущенных в воду, подкисленную серной кислотой (рис. 3), работает за счет своего *Zn*. Этот металл легко растворяется в кислоте, образуя цинковый купорос, и выделяя при этом энергию, энергию, однако, не тепловую, как при обычном окислении, а — электрическую. Количество цинка, предназначенного для этого (сгорания), таким образом все уменьшается по мере действия генератора. Это довольно дорогое „топливо“ употребляется в очень многих элементах, хотя, конечно, усилия изобретателей направлены к замене его более дешевым, к устройству такого элемента, в котором сгорал бы, например, уголь.

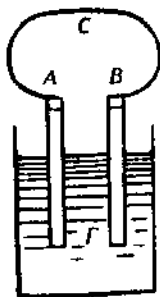


Рис. 3.

В элементе Вольты медь является положительным полюсом, а *Zn* — отрицательным.

Приступающие к изучению электрического тока обыкновенно задумываются над вопросом, где начинается электр. ток, куда он приходит раньше. На деле же постоянный ток идет *одновременно и один и тот же по всей цепи*, именно потому что электричество описывает всегда замкнутый путь, непрерывно „циркулирует“ по цепи. В первый момент, когда только-что замкнули элемент, или пустили в ход динамомашину, дело происходит сложнее; ток распространяется по цепи от точки к точке, устанавливается; но этот кратковременный процесс на практике постоянных токов не имеет значения.

Как следствие этой циркуляции электричества, мы всегда рассматриваем, изучая ток, цепь внешнюю (*ACB* на рис. 2) и внутреннюю (проводники генератора, *BGA*). Как второй результат того же самого факта, следует запомнить, что измеритель тока может быть включен

в любую часть (неразветвленной) цепи; он везде должен дать одно и то же показание.

Наконец, необходимо разъяснить еще одно недоумение, обыкновенно возникающее у начинающих; откуда мы знаем направление тока? Мы его не знаем; оно может стать известным лишь после определенного ответа на вопрос, что такое электричество. Мы называем $(+)$ зажимом генератора тот его полюс, который заряжен так, как заряжается стекло, потертое об амальгамированную кожу; это обнаруживается действием на электроскопе или особыми формами тихого разряда в воздух, наблюдаемыми в темной комнате при достаточно сильной электризации. Зажимом $(-)$ называется тот, который дает заряд подобный заряду эбонита, потертого о шерсть. (Необходимые подробности см. гл. IX, § 11, стр. 182). Таким образом различить полюса можно всегда и неопровержимо на опыте и различными способами. 1) Далее предполагаем, что $(+)$ заряд это — электричество, обладающее большею потенциальной энергиею, чем электричество на земле, а $(-)$ заряд — меньшею; отсюда устанавливаем, что во время тока электричество стекает по внешней цепи с $(+)$ на $(-)$, а внутри генератора, так сказать, поднимается к $(+)$; в этом последнем действии и заключается работа и назначение генераторного двигателя.

Таким образом, получается направление тока (рис. 6). Но в действительности, может быть, например, в случае того же рис. 6, электричество течет и обратно, как это и представляется теперь электронной теорией. Наконец, можно представлять себе, что электричество течет сразу в двух взаимно противоположных направлениях; например, на рис. 6 $(-)$ электричество течет по часовой стрелке, а $(+)$ электричество обратно. Для первоначального курса об электрическом токе это не имеет никакого значения. Условиться же раз навсегда в направлении тока необходимо, так как относительно этого направления приводятся далее законы направления электромагнитных сил, электромагнитной индукции и разложения веществ. Если мы вдруг будем считать, что ток по внешней цепи идет от $(-)$ к $(+)$, а все правила электромагнетизма и электрохимии сохраним, то все

¹⁾ Напр., довольно сильный отрицательный заряд от статической машины на заостренном предмете сказывается в том, что в угольной зажженной лампе накаливания, поднесенной к острию, нить ее приходит в сильное колебание; положительно заряженное острие, наоборот, останавливает колебания нити.

наши ожидания окажутся на опыте ложными; тогда нужно и все правила заменить на обратные. Следовательно, нужно просто остановиться на какомлибо условии.

Наше незнание направления тока не может принести никакого ущерба практическому пользованию им, так как ток всегда замкнут на себя; если бы он мог быть разомкнутым, только тогда мог бы возникнуть вопрос, куда он раньше приходит, а следовательно, и, в каком направлении течет ток.

10. Энергия тока. Практическая система единиц. Овладеть электр. током, это значит уметь предвычислить энергию, выделенную им, в любых единицах энергии (работы); уметь разобрать, какая часть этой энергии идет на нагревание цепи, и какая на другие явления; уметь разместить (локализовать) выделение энергии в разных частях цепи, т.-е., например, понять, почему в нити лампы накаливания выделяется столько тепла, что она поддерживается раскаленною, а в проводах, идущих к ней, несущих тот же самый ток, выделяется так мало тепла, что они кажутся холодными.

Очень часто вычисляют не энергию тока, но его мощность, т.-е. энергию, выделяемую им в единицу времени, или работу, которую он совершает за каждую единицу времени, иными словами — скорость работы.

Все эти вычисления производятся не так, как вычисляется работа или скорость работы механических двигателей, т.-е. подсчетом действия отдельных частей механизма, их связи и т. д. Механизм электрического генератора, например, элемента, слишком сложен, так как его действие основывается на внутренних, молекулярных процессах; многое в нем непонятно.

Вычисления эти производятся на следующем основании:

Роль генератора заключается в том, что он придает известную потенциальную энергию зарядам (количествам) электричества, которая и обнаруживается немедленно в токе этого электричества, при возвращении его к (—) зажиму. Как велик протекший заряд — это зависит при прочих равных условиях от времени (t) действия генератора; он может быть, вообще говоря, каким угодно; назовем его Q единиц количества электричества. Если потенциальную энергию, которую придает генератор каждой единице количества электричества, или работу, которую в цепи выполняет каждая единица количества электричества, назовем E , то все, что произвел генератор, мы должны считать равным

$$W = Q \cdot E. \quad (1)$$

Это и есть полная работа нашего генератора по всей цепи за все время t . Этому же равно все, что мы получили за это время от него или, как выражаются, „от тока“.

Необходимо понять, что произведение E и Q есть работа, или потраченная на нее энергия; оно может быть измеряемо, как всякая работа, в килограммометрах, эргах, калориях, пудофутах и т. п.; но E — энергия каждой единицы электричества — *не есть работа* и не может быть измеряема, например, в эргах.

Если какой-либо подъемный кран может поднимать грузы на 5 м, то эти 5 м могут быть названы работою его *на каждый* поднятый килограмм; метры без всякой оговорки не могут быть мерою работы, и действительная работа нашего крана может быть определена, лишь если будет задан поднятый вес; например, при поднятии одной тонны она равна

$$5 \cdot 1000 = 5000 \text{ кг/м.}$$

E называется электродвижущею силою генератора; будем обозначать ее: эдс. Эдс измеряется в особых единицах, при чем, как и всегда поступают при выборе единицы для какой-либо величины, некоторая электродвижущая сила принимается за единицу: всякую другую эдс сравнивают с нею. Таких единиц, разумеется, можно выбрать сколько угодно. На практике установлены единицы для всех электрических измерений, образующие собою удобную для технических целей, так называемую *практическую* систему, которою мы во всем изложении будем пользоваться.

Единицею эдс в этой системе служит *вольт* (прибл. равен эдс элемента Вольты); вольт мы будем обозначать знаком V .

В дальнейшем мы увидим, как измеряются, т. е. сравниваются с единицею, величины E .

Единицею работы в практической электрической системе служит 10^7 эргов; эта работа называется *джоулем*. Если принять приблизительно кг/м за 10^8 эргов, то мы получаем, что $1 \text{ кг/м} = 10$ джоулям (более точно: $1 \text{ кг/м} = 9,8$ дж.); это сопоставление дает возможность получить ясное понятие о работе равной одному джоулю.

11. Измерение количества электричества; величина (сила) тока. Основным и наиболее простым по конструкции прибором, позволяющим измерить, какое количество электричества протекло по цепи, служит водяной вольтметр.

Он представляет собою согнутую стеклянную трубку (рис. 4), заполненную водным раствором серной кислоты; в A и B впаяны платиновые электроды, соединяющие вольтметр с генератором. Если

ток направлен от A к B , то на B выделяется водород (H_2) на A — кислород (O_2); выделяющиеся газы скопляются в верхних частях обоих колен трубки, подразделенных на куб. см; вытесняемая при этом жидкость поднимается в отростке C , открытом сверху. По количеству выделившегося водорода и можно судить о количестве протекшего электричества, так как с каждой молекулой газа по трубке проходит известный определенный заряд.

Единицу количества электричества в практич. системе считается заряд, пронесенный массой водорода, занимающего объем

$$0,116 \text{ куб. см.}$$

при 0° Ц и 760 мм давления. Эта единица называется *кулоном*.

Если прибор показывает, что водород выделился в объеме V (0° , 760 мм), то

$$Q = \frac{V}{0,12} \cdot \text{кулонов.}$$

Число $0,0116$, указанное нами, не совсем точно. Дело в том, что кулон определяется, как такое количество электричества, которое, протекши под эдс в 1 В (уравн. 1), выделяет энергию в 1 джоуль . Это выражается так:

$$\text{один джоуль} = \text{вольт} \times \text{кулон.}$$

Этим положением совершенно определено устанавливается, что такое кулон; но необходимо тщательное определение джоуля и вольта, чтобы на опыте узнать, какой объем водорода (0° , 760 мм) выделяется этим зарядом. Невозможно ожидать такой случайности, чтобы при этом способе определения объем водорода, выделенный одним кулоном, выражался каким-либо круглым числом. Остается принять его таким, какой выходит на опыте.

Чем более совершенствуется техника электрических измерений, тем точнее узнается этот объем.

Вывод единицы количества электричества полезно запомнить, так как это для нас первый пример того, как составляется практическая система. В основу ее кладется возможно меньшее число совершенно произвольных единиц; единицы же остальных величин

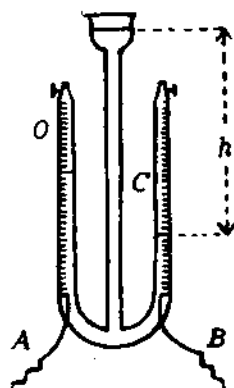


Рис. 4.

выводятся из них; так, мы приняли джоуль и вольт за исходные единицы, и тогда единица для колич. электричества вытекает уже сама собою из уравнения (1).

Величиною или, как чаще говорят, силою тока называется скорость протекания электричества, т.-е. число кулонов, протекающее через любое сечение проводника в одну секунду. Если по цепи протекло колич. электричество Q за время t сек. (единицею времени в практич. системе всегда принимается *секунда*), то величина тока, которую мы будем обозначать i , равна

$$i = \frac{Q}{t}. \quad (2)$$

В практич. системе ток $i = 1$, если в 1 сек. протекает один кулон; в этом случае, действительно, $i = 1/1$; такая величина тока называется *ампером* (A).

Амперы нужно умножить на время прохождения тока, чтобы узнать протекшее количество электричества [из уравни. (2)]:

$$i \cdot t = Q. \quad (3)$$

Кулон есть ампер-секунда; иногда употребляются большие меры колич. электричества, не принадлежащие уже практической системе, как, например, ампл.-минута (60 кул.), ампл.-час (3600 кул.).

С помощью вольтметра можно по формуле (2) измерить и ток, если наблюдается время t , и если существует убеждение, что скорость протекания электричества была равномерна за все это время; неудобство представляет то обстоятельство, что для измерения тока по вольтметру необходимо наблюдать и на часах, и приходится довольно долго ждать, пока выделится объем водорода достаточный для точного измерения. В виду этого более употребительны амперметры, описываемые ниже, позволяющие в каждый момент знать i ; вольтметр, как основной прибор, служит для выверки амперметров.

12. Другое выражение энергии тока; мощность тока. Выражение (1) заменю Q по уравнению (3) получает вид

$$W = EO = Eit. \quad (4)$$

Здесь джоули, выделяемые генератором, представлены, как произведение: вольты $\times$ амперы $\times$ секунды.

Отсюда уже легко решается, как измерить скорость работы, т.-е. мощность цепи (а след., и генератора):

$$P = \frac{W}{t} = Ei. \quad (4')$$

Мощность цепи равна: вольты $\times$ амперы; она равна единице, когда выделяется 1 джоуль за каждую секунду; эта (практическая) ед. мощности называется *ваттом*. Ватт-сек., т.-е. работа, совершенная при мощности в один ватт в течение 1 сек., и есть джоуль. Часто применяются большие меры работы, выражаемые через ватт, но уже не принадлежащие практической системе: ватт-час (3600 джоулей), гектоватт-час (3600 $\cdot$ 100 джоулей), киловатт-час (3600 $\cdot$ 1000 $\equiv$ 36 $\cdot$ 10⁵ джоулей).

Ватт, как мера мощности, может быть сравним с лош. силою; 1 л. с. есть 75 кг/м. в секунду $\equiv$ 750 дж. в сек., т.-е. 1 л. с. $\equiv$ 750 ваттам. Если перевести кг/м в джоули с большею точностью, то получаем

$$1 \text{ л. с.} = 736 \text{ ватт.}$$

$$1 \text{ киловатт} = 1,36 \text{ л. с.}$$

Как и всякая машина, электрическая цепь, как машина, перерабатывающая электрическую энергию, оценивается мощностью; так, например, электрическая цепь, дающая в большом городе электрическое освещение и тягу трамваев, обладает мощностью равною десяткам тысяч киловаттов.

13. Падение потенциала; отдача генератора. Когда генератор замкнут на внешнюю цепь, по всей цепи происходит круговращение электричества; так как в каждом сечении проводника выделяется по крайней мере тепловая энергия, то в каждом сечении электричество теряет часть энергии, приобретаемой в генераторе; иными словами, потенциальная энергия электричества падает последовательно от точки к точке по направлению тока. Обыкновенно выражаются сокращенно: „по всей цепи падает потенциал“.

Падение потенциала по внешней цепи будем называть E_1 , по внутренней E_2 . Протекшее за некоторое время колич. электричества Q во внешней цепи отдает энергию QE_1 , а во внутренней QE_2 . Сумма этих энергий равна полной работе тока в цепи:

$$QE_1 + QE_2 = QE,$$

где E полная эдс генератора [форм. (1)]. Отсюда выводим, что ясно и само собой,

$$E_1 + E_2 = E, \quad (5)$$

т.-е. как только идет ток, эдс генератора распадается на два падения потенциала: внешнее и внутреннее.

Энергию QE_1 во внешней цепи мы называем полезною энергиею, предполагая, что все то, что производится током во внешней цепи,

отвечает цели электрической установки; энергия QE_2 не носит этого характера; она идет, например, на нагревание генератора — явление бесполезное, иногда даже вредное. Число, показывающее, какую часть полной работы генератора представляет энергия, идущая на внешнюю цепь, будем называть *полезным действием или отдачей генератора*; оно получается делением:

$$a = \frac{QE_1}{QE_1 + QE_2} = \frac{E_1}{E} \quad (6)$$

Таким образом, полезное действие генератора есть частное от деления внешнего падения потенциала на полную эдс цепи. Умножив это частное на 100, мы выразим отдачу в процентах. Здесь нам особенно важно вспомнить, что ток идет всегда по замкнутому пути, а, следовательно, непременно идет и через генератор, выделяя и в нем часть своей энергии. Поэтому может показаться, что электрический генератор по существу невыгоден; он непременно потребляет на себя энергию QE_2 , и с ним никогда не может быть достигнута отдача — 100% ($QE_2 \neq 0$). Но должно вспомнить, что нет в мире машины, которая во время своего действия не тратила бы части своей работы на себя; паровая машина, например, тратит энергию на движение своих частей, на преодоление различных сопротивлений между ними. Оказывается, что электрический генератор в сравнении с другими машинами очень мало тратит на себя. Мы увидим в следующей главе, как достигается необычайно высокое полезное действие электрического генератора.

Очень важно узнать падение потенциала не только по всей внешней цепи, но и между любыми ее точками a и b (рис. 5); такую разность потенциалов E_{ab} можно определить, непосредственно измерив энергию единицы электричества в точке a и в точке b так называемыми статическими приборами. Это определение особенно поучительно, так как позволяет воочию убедиться в верности всего нашего представления о токе, как перемещении электричества с мест большей потенциальной энергии в места — меньшей. Но на практике измерение всякой E_{ab} произво-

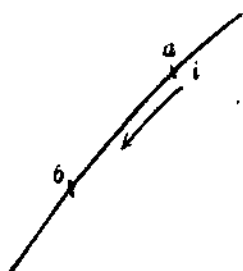


Рис. 5.

дится часто косвенным путем, помощью вольтметров (не смешивать с вольтметром, измеряющим Q), пропускающих через себя ток, к устройству которых подойдем впоследствии.

Определив падение потенциала вдоль участка ab , мы можем выразить энергию, выделенную в этом участке, и равную

$$E_{ab} \cdot Q = E_{ab} \cdot i \cdot t \text{ джоулей}$$

и мощность, равную

$$E_{ab} \cdot i \text{ ваттов.}$$

Заметим, что в дальнейшем совершенно одинаково употребляются следующие термины для обозначения величины E_{ab} : разность потенциалов между точками ab , падение потенциала, напряжение в участке ab , вольтаж, потеря напряжения на проводе ab .

14. Способы соединения генераторов. Генераторы могут быть соединяемы по несколько для совместной работы; это соединение производится по двум главным типам. При последовательном соединении они включаются в цепь один за другим (рис. 6), примыкая друг к другу противоположными полюсами и, таким образом, действуя в цепи все в одном направлении. Каждая единица электричества, пройдя через все генераторы, приобретает энергию, равную сумме энергий, сообщаемых каждым генератором в отдельности. Полная эдс цепи равняется в этом случае сумме эдс всех генераторов. Здесь генераторы могут быть и различными по своим эдс.

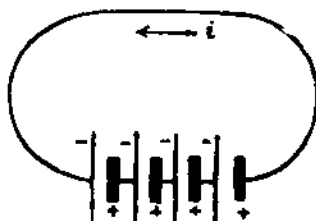


Рис. 6.

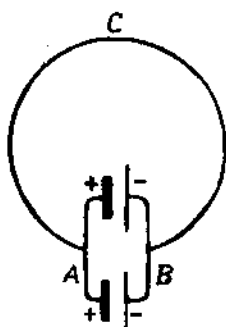


Рис. 7.

При параллельном соединении все одноименные полюса генераторов соединяются в один (рис. 7). Таким образом получается два общих полюса, к которым и примыкается внешняя цепь. Здесь все генераторы должны быть одной и той же эдс; иначе случится, что один из них, имеющий меньшую эдс, будет позволять другому работать на него, т.-е. послужит для другого внешнею цепью. При условии равенства эдс работа всех генераторов направляется в одну и ту же внешнюю цепь. Эдс всей цепи, как это понятно

из фигуры, будет тою же, что и при одном генераторе.

Параллельная работа генераторов заключается в том, что каждый берет на себя лишь часть всего количества электричества, протекающего по цепи, при чем все они придают каждой единице эле-

тричества, проходящей через каждый из них, одну и ту же энергию. На какие именно части разделяется протекающее электричество, это будет понятно лишь из следующей главы.

В случае элементов, генераторы, соединенные в описанные группы, составляют *батарею*.

15. Заключение. В этой главе изложены главнейшие выводы, являющиеся результатом всех наблюдений над электрическим током.

В цепи тока всегда имеется генератор; цепь должна представлять собою замкнутый токовый путь, без перерывов; энергия электричества уменьшается по всей цепи, при переходе из одного сечения проводника в следующее; уменьшается она и в генераторе, который тоже должен иметь в себе проводник, и по которому непременно идет тот же ток. Но в генераторе электрическая энергия кроме того и возрастает; если она уменьшается внутри генератора на E_2 (на каждую ед. электричества), то возрастает на величину большую, E ; разность

$$E - E_2 = E_1$$

представляет собою энергию, отдаваемую единицею электричества во внешней цепи.

Все это обычные представления, основанные на принципе сохранения энергии. Типичным для учения об электричестве является необходимость с первого же шага *разложить* выражение для энергии на два множителя

$$W = QE.$$

Во всем дальнейшем мы увидим подтверждения того, что можно получить весьма энергичные, резкие электрические явления со сколь угодно малыми Q , но соответственно большими E .

Не умея разложить выражение для электрической энергии, не зная о существовании эдс, или, как говорят, „множителя напряжения“, мы не могли бы понять, например, каким образом происходит выделение энергии во всей цепи, когда электричество циркулирует по ней, не уменьшаясь в количестве. Мы бы не поняли, что все дело в уменьшении потенциальной энергии этого электричества.

Только с помощью этого понятия можно говорить вообще о каком бы то ни было электрическом процессе. Электричество сохраняется, как в цепи тока, также и при всех других явлениях; что же происходит, когда мы вырабатываем, генерируем его, или когда мы его тратим? Эти процессы заключаются единственно в повышении потенциальной энергии, в увеличении множителя (фактора) напряжения или в уменьшении его.

Количество же Q при этом лишь переносится с одного места в другое.

Заметим, что замкнутость пути электричества столь ясная для случая постоянного тока по замкнутой цепи, имеет место и во всяком другом случае движения электричества, хотя бы оно и не происходило по непрерывному проводящему пути. Об этом говорится в гл. XII § 15.

В этом заключается разница между тем, как мы понимаем количество тепла и количество электричества; число калорий должно, действительно, уменьшиться, если тепловая энергия растрачивается, например, обращаясь в механическую. Калория сама по себе уже есть энергия (тепловая единица энергии), тогда как кулон вовсе не может служить мерою энергии.

Когда паровая машина работает, число калорий, выходящих из нее (в холодильник), непременно меньше, чем число калорий, вошедших в нее из топки за то же самое время; число же кулонов, выходящих из трамвайного двигателя, какую бы тягу он ни развивал, всегда равно числу кулонов, входящих в него.

16. Примеры. 1. Во сколько времени воздушный шар, емкостью в 0,1 куб. м наполнится водородом, добываемым помощью разложения воды электрическим током ≈ 10 А?

Считая, что 1 А в мин. дает 6,96 куб. см водорода, получаем:

$$10 \cdot t \cdot 6,96 = 10^5,$$

где t имеет наименование минуты; искомое время $\approx 23,96$ часа, т.-е. приблизительно 24 часа.

Сколько при этом наполнении потрачено энергии, если эдс цепи равна 20 В?

$$Eit = 20 \cdot 10 \cdot 24 = 48 \text{ гектоватт-часов.}$$

2. Каждая лампа накаливания поглощает 50 ватт; сколько ламп может поддерживать в состоянии горения одна лошадь, если отдача электр. генератора, который этою лошадью приводится в действие, равна 60%?

$$750 \cdot 0,6 = 50 x; \quad x = 9 \text{ ламп. } ^1)$$

3. Сколько стоит 6 часов горения лампы в 50 ватт, если 1 гектоватт-час стоит 3 коп.?

За 6 час. лампа потребляет $\frac{1}{2} \cdot 6 = 3$ гектоватт-часа, что будет стоить 9 коп.

¹⁾ Если принять, что 1 л. с. = 750 ватт (ср. стр. 29).

4. Сколько джоулей в одной калории?

1 бол. кал. = 427 кг/м. = прибл. 4180 джоулей; 1 мал. кал. = 4,18 джоулей.

5. Какой ток под 100 V может нагреть в 5 мин. литр воды с 20° до 100°? [форм. (4)].

$100 \times i \times 5 : 60 = 1000 \times (100 - 20) \times 4,17$; $3 \cdot 10^4 i = 34 \cdot 10^4$; $i = 11\frac{1}{3}$ А.

ГЛАВА II.

ЗАКОН ОМА.

1. Закон Ома. В этой главе мы будем иметь в виду такую электрическую цепь, в которой нет ни электродвигателей, находящихся в движении, ни вольтметров, выделяющих химическую энергию; в такой цепи вся работа генератора, вся его эдс E , т.-е. вся энергия каждой единицы электричества идет исключительно на производимое током нагревание проводников цепи. Примером такой цепи служит осветительная сеть, в которой ток идет на накаливание нитей в лампах и нагревание проводов.

Опыт показывает, что в этом случае при одной и той же эдс E токи могут быть различны, если вместо одних проводников возьмем другие, отличающиеся от первых по размерам или материалу.

Ом в 1820 г. установил закон, определяющий зависимость между величиной тока i и эдс E , введя еще одно электрическое понятие: электрическое сопротивление цепи (R); сопротивление есть такое свойство цепи, которое мешает току, и потому величина i должна быть обратно пропорциональна R , тогда как она, конечно, прямо пропорциональна E , как своей непосредственной причине. Таким образом получается закон Ома:

$$i = \frac{E}{R}, \quad (7)$$

или

$$E = iR. \quad (7')$$

Мы знаем уже, как измеряется i ; в этой главе мы увидим, как измеряется R ; формула (7') показывает, что с помощью этих двух величин определяется эдс цепи, эта основная величина в нашем учении об электрическом токе.

Закон Ома вполне общ; если в цепи совершается и механическая работа или приобретается химическая энергия, все же ток идет по закону Ома; но только тогда под E следует разуметь не всю эдс

генератора, а лишь ту часть ее, которая идет на ток, т.-е. на нагревание. Какая это именно часть, что должно быть вычтено из E в этих случаях — мы узнаем ниже (гл. VII, § 8 и гл. VIII, §§ 2 и 8).

Мы написали закон Ома в применении ко всей цепи, но он может быть написан и для любого ее участка ab (рис. 5); для ab мы должны получить ту же самую величину i , что и из формулы (7), так как по всей цепи идет один и тот же ток: следовательно, по закону Ома, если разность потенциалов E_{ab} , действующую в этом участке, разделим на сопротивление его R_{ab} , то получим:

$$i = \frac{E_{ab}}{R_{ab}}, \quad (8)$$

$$E_{ab} = i \cdot R_{ab}. \quad (8')$$

Последняя форма закона Ома находит весьма большое применение. ЭДС какого-либо участка цепи равна току, помноженному на сопротивление этого участка.

2. Закон Джоуля-Ленца; другое выражение для полезного действия генератора. Мы видели (форм. 4), что работа генератора выражается через

$$W = Eit.$$

Если вся его работа идет на нагревание, то, по закону Ома, E может быть заменено произведением iR ; тогда работа генератора, т.-е. полное выделенное тепло во всей цепи за время t

$$W = i^2 \cdot Rt. \quad (9)$$

Это и есть закон Джоуля-Ленца, позволяющий предвычислить количество тепла, выделяемого током в проводнике известного сопротивления. Условно называют формулу 9 выражением „джоулева тепла“. Этот закон был найден Джоулем и Ленцом, независимо одним от другого, чисто опытным путем, а не так, как его выводят теперь из формулы 4 и закона Ома. Вообще многие факты, которые при настоящем состоянии науки оказываются простым следствием других, ранее известных, были открываемы, как нечто совершенно новое, когда теория не стояла еще так высоко. И Джоуль, и Ленц погружали проводник, несущий ток, в калориметр и наблюдали, как зависит тепло, появляющееся в калориметре, от t , от i и от R ; таким образом они открыли, что, если увеличить ток в 2 раза, то за то же самое время, в том же самом проводнике выделяется тепла в 4 раза больше и т. д.

Мы написали закон Джоуля-Ленца для всей цепи; но он также справедлив и для любого участка ab ; тепло, выделяемое здесь, равно

$$W_{ab} = E_{ab} \cdot it;$$

воспользовавшись формулой (8') мы имеем

$$W_{ab} = i^2 R_{ab} \cdot t. \quad (10)$$

Собственно говоря, эту форму закона и вывели Джоуль и Ленц на своих опытах, так как они погружали в калориметр не всю цепь с ее генератором. Это последнее выражение позволяет определить, как локализуется выделение тепла в электрической цепи; его выделяется, при одном и том же токе во всей цепи, больше в тех участках, где большее сопротивление; так, например, сопротивление волоска калильной лампы делается во много раз большим, чем сопротивление проводов; поэтому почти все выделяемое током тепло оказывается в лампах и лишь несколько процентов его величины в проводах.

Тепловую мощность всей цепи или любого участка выражают чрез:

$$\frac{W}{t} = i^2 R; \quad \frac{W_{ab}}{t} = i^2 R_{ab}.$$

С помощью закона Ома мы можем еще более упростить и вместе с тем полнее понять выражение для полезного действия генератора [форм. (6)]:

$$a = \frac{E_1}{E_1 + E_2} = \frac{r_1 i}{r_1 i + r_2 i} = \frac{r_1}{r_1 + r_2},$$

где под r_1 мы разумеем сопротивление внешней цепи, а под r_2 — внутренней. Разделив числителя и знаменателя на r_1 , мы получаем:

$$a = \frac{1}{1 + \frac{r_2}{r_1}}, \quad (11)$$

т. е. отдача электро-генератора тем выше, тем ближе к единице (100%), чем меньше $\frac{r_2}{r_1}$, т. е. чем меньше сопротивление генератора в сравнении с сопротивлением внешним. Этим руководствуются и при выборе генератора (напр., аккумуляторов с их малым сопротивлением вместо элементов), этим же оцениваются и свойства цепи при данном генераторе.

При всяком генераторе мы можем рассматривать два предельных полезных действия: 100%, когда $r_1 = \infty$, т.-е. цепь разомкнута; но тогда и ток не идет, цепь не работает; 0%, когда $r_1 = 0$, идеальное „короткое замыкание“; в этом случае вся энергия генератора обращается на него самого; короткое замыкание, даже не идеальное, может сжечь динамомашину и разрушить аккумуляторные пластинки, так как при малом сопротивлении генератора оно характеризуется чрезмерно большим током.

Чтобы пользоваться всеми этими выражениями, необходимо ясно понимать, от чего зависит электрическое сопротивление и как оно измеряется. К решению этих вопросов мы и должны перейти.

3. Электрическое сопротивление. Практическая ед. сопротивления. Величина R зависит от материала проводника, но кроме того она изменяется и с размерами проводников, сделанных из одного и того же материала.

Ом установил, что

$$R = k \cdot \frac{l}{s}, \quad (12)$$

где l и s суть длина и сечение проводника, а k *удельное сопротивление*, характерное для каждого тела. Формула (12) показывает, что k есть сопротивление такого куска данного материала, в котором $l = 1$ дл. и $s = 1$ кв. ед.

Величина $\frac{1}{R}$, как обратная сопротивлению, называется *проводимостью* проводника; она равна

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{k} \cdot \frac{s}{l};$$

$\frac{1}{k}$ называется *удельною проводимостью* данного материала.

Между всеми телами наименьшим k обладают металлы с серебром во главе; из тел жидких при обыкновенной температуре меньшим сопротивлением (кроме ртути) обладают некоторые растворы кислот и солей. При этом наблюдается тот факт, что растворы имеют наименьшее сопротивление при некотором определенном содержании растворяемого тела, так, например, для серной кислоты, растворенной в воде, наименьшее сопротивление оказывается при концентрации 30,4%.

Лучшие изоляторы (наибольшее k) суть: каучук, эбонит, фарфор, сера, стекло, слюда, очищенное масло, газы.

Существует связь между электропроводностью и теплопроводностью, так, например, для металлов относительно серебра (обе проводимости которого приняты за 100):

	Электропроводность.	Теплопроводность.
Серебро	100	100
Медь	94,1	74,8
Золото	73,0	54,8
Платина	16,6	9,4
Железо	15,5	10,1
Олово	11,4	15,4
Свинец	7,6	7,9
Висмут	1,1	1,8

Сопротивление тел в огромном большинстве случаев изменяется с температурой тела, при чем у металлов оно обыкновенно возрастает с повышением температуры, а у дурных проводников, как уголь, жидкости, а также у так называемых изоляторов — оно уменьшается.

Следующая таблица дает изменение (p) сопротивления на каждую единицу сопротивления при нагревании тела на 1°C .

Железо	+ 0,005	Серебро	+ 0,00377
Сурьма	+ 0,00389	Аш, Zn, Pb	+ 0,00365
Медь	+ 0,00388	Hg.	+ 0,00072
Олово	+ 0,00387	Уголь	+ 0,0003

Чтоб узнать сопротивление R_1 при температуре t , по сопротивлению R_0 при 0°C , нужно вычислить

$$R_1 = R_0 + p \cdot t; \quad R_1 = R_0 (1 + pt).$$

Величина p называется температурным коэффициентом; таблица показывает, что у всех твердых химически-чистых металлов, кроме магнитных (Fe) p = приблизительно + 0,004.

Весьма замечательно, что это число приблизительно равно коэффициенту расширения идеальных газов (0,00367). Если принимать, что p также независимо от температуры, как коэффициент расширения идеальных газов, т.-е. что химически чистые металлы уменьшают неизменно свое сопротивление на $1/273$ при охлаждении на 1°C , то их сопротивление при абсолютном нуле должно быть равным нулю; при температуре ноль кельвинов они должны оказаться абсолютными проводниками, т.-е. проводить электрическую энергию без всякой потери на джоулево тепло.

Примеси к чистым металлам увеличивают их удельное сопротивление, весьма сильно уменьшая температурный коэффициент.

Плохие проводники и изоляторы, повидимому, обладают минимумом сопротивления, некоторые (как уголь, кварц) — при очень высокой температуре.

Единица сопротивления. Давно уже явилась потребность в единице для сравнения сопротивлений.

В практической системе за единицу сопротивления принимается такое, чрез которое проходит ток в 1 А под разностью потенциалов в 1 В; это сопротивление, действительно, должно быть признано за единицу по закону Ома:

$$i = \frac{E_{ab}}{R_{ab}} = \frac{1}{1} = 1.$$

Точными измерениями установлено, что такому определению единицы сопротивления удовлетворяет ртутный столб 106,3 см длиной и 1 мм² сечением при 0° Ц. Эта единица называется *ом* (Ω). Разумеется, проводники с сопротивлением равным 1Ω можно приготовить и из всякого другого проводящего материала.

Если все величины правой части формулы (10) будем измерять в практической системе, т.-е. i в амп., R_{ab} в омах, t в сек., то все произведение, как выражающее энергию, будет давать джоули:

$$W \text{ джоулей} = i^2 R t \text{ (амп.}^2 \times \text{ом} \times \text{сек.)}.$$

Чтобы перевести в малые калории, следует полученное число джоулей умножить на 0,239.

4. Последовательное соединение сопротивлений; реостаты. Электрическая цепь состоит обыкновенно из нескольких сопротивлений, которые ток проходит последовательно; под сопротивлением цепи R следует разуметь сумму последовательно введенных сопротивлений; действительно, если, например, имеем цепь, состоящую из генератора с внутренним сопротивлением r_2 и двух последовательных внешних сопротивлений r_1 и r_3 , то полная электродвижущая сила E = сумме падений потенциала вдоль всей цепи, т.-е. по формуле (8¹)

$$E = ir_1 + ir_2 + ir_3 = i(r_1 + r_2 + r_3);$$

откуда

$$i = \frac{E}{r_1 + r_2 + r_3};$$

но так как $i = E/R$, то

$$R = r_1 + r_2 + r_3.$$

Отсюда следует простой способ изменять величину тока данной цепи, $i = \frac{E}{R}$, введением последовательно с ее сопротивлениями

постороннего проводника желаемой величины; приборы, служащие для этой цели, называются реостатами.

Ящичный реостат (рис. 8) представляет собою ящик, обыкновенно деревянный, с эбонитовой доской, внутри которого помещаются катушки тонкой проволоки; концы катушек, проходя сквозь крышку, припаиваются к толстым медным пластинкам; снаружи между этими пластинками могут быть плотно вставлены медные втулки. Около каждого места втулки означено в омах, какое сопротивление представляет соответственная катушка; реостат вводит такое сопротивление в виде последовательно соединенных катушек между *a* и *b*, какое представляется суммой омов, отмеченных у мест *вынутых* втулок. Вынимая различные втулки, можно различно изменять введенное сопротивление, но все-таки лишь скачками; на рис. 8

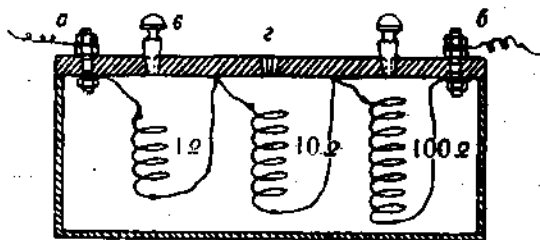


Рис. 8.

для примера показано, что вынута средняя втулка *2* и этим введено сопротивление в 10Ω .

Таким образом приготавливаются точные „магазины сопротивлений“, могущие служить эталонами сопротивления, т. е. образчиками, точно сверенными с единицею, употребляемые при измерениях. Для постоянства этих эталонов весьма важно, чтобы сопротивление их возможно мало изменялось от неизбежных колебаний температуры; поэтому они приготавливаются из материалов, имеющих особенно малый температурный коэффициент; таковыми оказываются многие сплавы, напр.:

фосфорная бронза	$p = + 0,0008$
нейзильбер	} 0,0003
платина-серебро	
пл тиноид	0,0002
манганин	0

5. Внешнее и внутреннее падение потенциала; наибольшая работа элемента. Пользуясь законом Ома, мы можем вычислить, как распределяется в различных случаях эдс *E* между внешней и внутренней частями цепи.

Пусть генератор производит в цепи всегда одну и ту же электродвижущую силу E ; этим свойством обладают хорошие элементы.

Представим себе, что внешнее сопротивление изменяется от очень малого до очень большого; разность потенциалов у концов внешней цепи, или зажимов генератора, относится к падению потенциала во внутренней части цепи, как сопротивление внешней части цепи к сопротивлению внутренней; действительно

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_1 i}{r_2 i} = \frac{r_1}{r_2}; \quad (13)$$

сопротивление генератора r_2 будем считать постоянным, а потому, как показывает уравнение, с увеличением r_1 увеличивается E_1 ; так как всегда $E_1 + E_2 = E$ (пост.), то E_2 при этом уменьшается.

Мощность, выделяемая током во внешней цепи, $P_1 = E_1 i$. Не следует думать, что с возрастанием r_1 она также непрерывно возрастает, как возрастает E_1 ; при очень малом внешнем сопротивлении P_1 равна 0, так как тогда $E_1 = 0$; при очень (бесконечно) большом сопротивлении она тоже равна 0, так как тогда $i = 0$ ($R = \infty$).

Это заставляет предполагать, что с увеличением r_1 мощность P_1 сначала возрастает от 0, затем убывает снова до 0, а, следовательно, P_1 имеет наибольшую величину при некотором значении r_1 .

Следующее рассуждение подтверждает этот вывод и позволяет вычислить величину r_1 , дающую наибольшую P_1 . Напишем, что мощность во внешней цепи равна полной мощности без мощности, выделяемой в генераторе:

$$P_1 = Ei - E_2 i = Ei - i^2 r_2.$$

или

$$\frac{P_1}{r_2} = \frac{Ei}{r_2} - i^2 = \left(i - \frac{Ei}{r_2} \right)^2.$$

Выражение в скобках представляет собою, если к нему приписать $\frac{E^2}{4r_2^2}$, квадрат двучлена $\left(i - \frac{E}{2r_2} \right)$; следовательно,

$$\frac{P_1}{r_2} = - \left(i - \frac{E}{2r_2} \right)^2 + \frac{E^2}{4r_2^2}.$$

Мы ищем максимальное значение P_1 (или $\frac{P_1}{r_2}$, так как r_2 постоянно); оно будет иметь место при наименьшем вычитаемом правой

части, так как ее уменьшаемое есть постоянная величина; вычитаемое, как квадрат, не может быть отрицательным, следовательно его, наименьшая величина есть 0; т.-е. для наибольшего значения P_1 необходимое условие:

$$i - \frac{E}{2r_2} = 0, \quad \text{или} \quad i = \frac{E}{2r_2}.$$

Если сравнить основную формулу $i = \frac{E}{r_2 + r_1}$ с только-что выве-

денною, то окажется, что условие P_1 максимум требует, чтобы $r_1 + r_2 = 2r_2$, т.-е. чтобы $r_1 = r_2$. Для максимальной величины P_1 внешнее сопротивление должно равняться внутреннему.

В этом случае, как показывает формула (11), полезное действие цепи $a = \frac{1}{2}$; т.-е. половина всей энергии тратится во внутренней цепи на нагревание элемента. Следует заметить, что это не есть наибольшее полезное действие; было (стр. 37) указано, что оно непрерывно, как и E_1 , возрастает с увеличением r_1 , и может быть сделано сколько угодно близким к единице. Наибольшая мощность во внешней цепи не есть самая выгодная работа генератора; ее полезное действие равно 50%.

Внутреннее сопротивление элемента, согласно формулы (12), уменьшается с увеличением размеров металлических пластин, погруженных в жидкость, и с приближением их друг к другу, так как размеры пластин определяют сечение (s), а расстояние между ними — длину (l) жидкого проводника в элементе.

При последовательном соединении n одинаковых элементов внутреннее сопротивление батареи в n раз больше сопротивления одного элемента, так как столб жидкости, проходимый током, становится в n раз более длинным, оставаясь при прежнем сечении.

При параллельном соединении n элементов внутреннее сопротивление в n раз уменьшается, так как в этом случае сечение столба жидкости в n раз больше, чем у одного элемента.

Если при одном элементе $i = \frac{E}{r_1 + r_2}$; то при n элементах, соединенных последовательно, $i = \frac{nE}{r_1 + nr_2}$, при m элементах, соединенных параллельно, $i = \frac{E}{r_1 + \frac{r_2}{m}}$; в случае n последовательно соединенных

групп из m параллельно соединенных элементов имеем

$$i = \frac{nE}{r_1 + n \frac{r_2}{m}}$$

6. Разветвление тока. Эквивалентное сопротивление. Опыт показывает, что если электрическая цепь, например, от точки a (рис. 9),

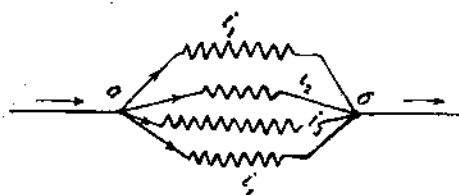


Рис. 9.

разделяется на несколько ветвей, то ток i направляется в каждую из ветвей некоторую свою часть i_1 , i_2 и т. д.: все эти части в точке b вновь соединяются в прежнюю величину i ; таким образом удовлетворяется общее

положение о постоянстве тока вдоль всей цепи:

$$i_1 + i_2 + \dots + i_n = i.$$

Закон Ома, примененный к участку цепи ab , позволяет определить токи i_1 , i_2 и т. д., если известна разность потенциалов E_{ab} ; действительно: $i_1 = \frac{E_{ab}}{r_1}$; $i_2 = \frac{E_{ab}}{r_2}$ и т. д. Отсюда следует, что $i_1 : i_2 = r_2 : r_1$; $i_1 : i_3 = r_3 : r_1$ и т. д., т.-е. части тока, идущие по ответвлениям, обратно пропорциональны сопротивлениям этих последних, или *прямо пропорциональны их проводимостям*.

Разумеется, что этот закон вполне применим и к генераторам, работающим параллельно (стр. 31); ток, входя в них, разделяется на части обратно пропорциональные сопротивлениям этих генераторов.

В случае *двух* сопротивлений, одно, например, r_2 , часто называется шунтом другого. „Шунт“ с английского слова *shunt* означает: ответвление. Часто бывает нужно, зная ток i_1 , определить полный

ток i . Так как $\frac{i_2}{i_1} = \frac{r_1}{r_2}$; то

$$\frac{i_1 + i_2}{i_1} = \frac{r_1 + r_2}{r_2}, \text{ или } \frac{i}{i_1} = \frac{r_1 + r_2}{r_2};$$

$$\text{т.-е. } i = i_1 \cdot \frac{r_1 + r_2}{r_2}.$$

множитель $\left(\frac{r_1 + r_2}{r_2}\right)$, на который нужно помножить i_1 , чтобы получить i , называется „постоянною шунта“.

Поставим себе вопрос, каким сопротивлением r можно заменить все ответвленные проводники так, чтобы ток в цепи не изменился, т.е. чтобы это сопротивление r пропустило через себя при разности потенциалов E_{ab} прежний ток i ? Искомое сопротивление r называется приведенным. Прежде вывода каких-либо формул обучающийся должен мысленно убедиться, что приведенное (или эквивалентное) сопротивление r должно быть меньше каждого из параллельных сопротивлений, следовательно, меньше даже самого малого из них; действительно, тем, что мы к этому наименьшему сопротивлению присоединяем какое бы то ни было еще параллельно, мы облегчаем путь электрическому току, т.е. уменьшаем сопротивление.

Согласно постановке вопроса $i = \frac{E_{ab}}{r}$; но, с другой стороны,

$$i = i_1 + i_2 + \dots = \frac{E_{ab}}{r_1} + \frac{E_{ab}}{r_2} + \dots,$$

т.е.

$$i = E_{ab} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots \right).$$

Из этих уравнений получаем

$$i = \frac{E_{ab}}{r} = E_{ab} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots \right),$$

или по сокращении на E_{ab} имеем

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n},$$

т.е.: „приведенная проводимость равна сумме проводимостей проводников в ответвлениях“. Разрешая это уравнение относительно r получаем:

$$r = \frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}}.$$

Для случая равных сопротивлений $r_1 = r_2 = r_3 = \dots = r_n$ получаем

$$r = \frac{1}{\frac{1}{n}} = \frac{r_1}{n}.$$

Для случая двух проводников

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

Полезно для памяти заметить, что последняя формула должна иметь такой вид, чтобы при $r_1 = r_2$ получилось $r = \frac{r_1}{2}$; этому условию она и в действительности удовлетворяет.

7. Потенциометрический метод. Этот метод всецело основывается на формуле 8¹. Пусть генератор E (рис. 10) замкнут некоторою

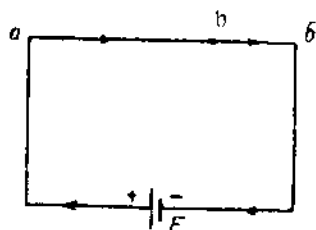


Рис. 10.

цепью; мы можем воспользоваться какою угодно малою частью всего напряжения по внешней цепи, взяв достаточно короткий участок ее, например, ab . Очень удобно поступать таким образом: генератор замыкается на прямолинейный провод ab большого сопротивления; если по сравнению с этим последним можно пренебрегать сопротивлением внутренним

и сопротивлением проводников, ведущих к a и b от генератора, то все вольты генератора считают находящимися между ab ; желаемую часть их получают, например, от точки a (снабженной зажимом) до скользящего контакта ϑ , устанавливаемого в должном месте.

Такой способ уменьшения вольт применяют очень часто; упомянем к примеру градуировку чувствительного гальванометра.

Если $E = 1\text{ V}$, сопротивление $ab = 10000\text{ ом}$ (рис. 11-а), $a\vartheta = 1\text{ ом}$, то в цепи Γ мы получаем $\frac{1}{10000}$ вольт; если сопротивление Γ гальванометра 500 ом , то через него пойдет ток приблизительно равный $2 \cdot 10^{-7}\text{ A}$; ¹⁾ если и этот ток все же велик для гальванометра, то включают добавочное сопротивление r (рис. 11-а); если $r = 9500\text{ ом}$, то мы получим ток равный 10^{-8} A .

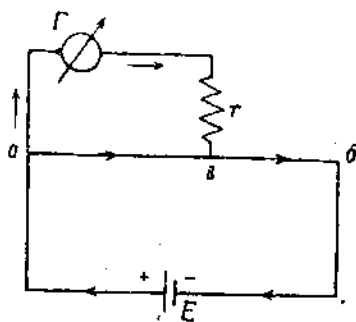


Рис. 11-а.

Отсюда усматривается одна из выгод описываемой схемы: включая гальванометр без потенциометра непосредственно в цепь элемента, мы для получения такого тока

¹⁾ Строго говоря, при включении ответвления Γ , падение между a и b уменьшается, так как сопротивление уменьшается. Легко решить, какое оно будет по форм. (7) и § 6. При большом сопротивлении гальванометра по сравнению с сопротивлением ab это имеет мало значения.

должны были бы иметь магазин сопротивлений не на 19500 ом, но почти в сто миллионов ом.

Потенциометр представляет собою хороший способ *сравнения эл.-дв. сил элементов*. Испытуемый элемент A включается в ответвление Γ и притом так, чтобы он стремился дать ток в этой цепи по направлению $a\Gamma a$, обратный току, даваемому разностью потенциалов av , т.-е. генератором E (рис. 11-б). Если скользящий контакт поставить в такое место v , чтобы разность потенциалов av была как раз равна эдс элемента A , то в ответвлении Γ тока не будет, что и узнают, смотря на гальванометр Γ ; при этом ток i , конечно, попрежнему течет по цепи $EabE$. Так как мы уравниваем эл.-дв. силы, то

$$\text{эдс } A = \text{эдс } av = i \cdot r_{av};$$

но, с другой стороны, вся $E = i r_{ab}$, следовательно,

$$A : E = r_{av} : r_{ab}.$$

Это последнее отношение равно просто отношению длин, и мы получаем:

$$A : E = av : ab.$$

Конечно, эдс A не должна быть больше E ; участок av будет тем меньше, чем они ближе к равенству. Если $A = E$ и $av = 0$, то наша схема обращается в два одинаковых элемента, включенных параллельно и работающих на цепь ab .

Не зная E , мы можем сравнить два элемента с эдс A и B ; для этого следует включить элемент A и определить точку v , затем на место A включить элемент B и определить соответствующую точку v_1 ; тогда $A : B = av : av_1$. Здесь замечательно то, что эдс сравниваются у элементов, не работающих, не дающих тока (избегается их поляризация).

Схема потенциометра может служить для установления вольты; при этом в цепь $EabE$ включается точнейший вольтметр; отсчет по вольтметру, соединенный с точным отсчетом времени по хронометру, даст i [форм. (3)]; если теперь между a и v имеется точно известное сопротивление, например, тщательно приготовленный ом в виде соответствующего столба ртути, то мы знаем с предельною точностью этих приборов вольты между a и v .

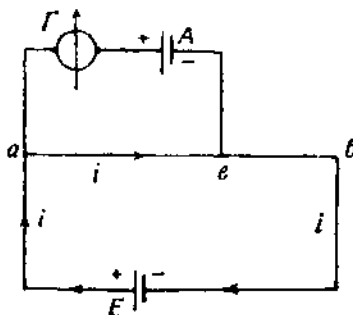


Рис. 11-б.

8. Мост Витстона. Мост Витстона представляет собою способ (схему) соединения проводников, весьма часто употребляемую при измерении неизвестного сопротивления, т.е. сравнения его с эталоном.

Схема состоит в том, что 3 ящичных магазина сопротивлений r_1 , r_2 , r_3 и неизвестное сопротивление x включаются между a и b

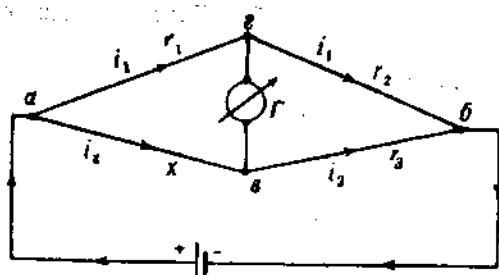


Рис. 12.

(рис. 12) цепи элемента так, что образуется две параллельных цепи avb и agb . В обеих этих цепях потенциал, понижаясь от своего значения в a до своего значения в b , проходит всевозможные промежуточные значения;

следовательно, для каждой точки z на agb мы найдем на avb такую точку v , которая имеет тот же потенциал, что и точка z .

Докажем, что если в точках z и v потенциалы одинаковы, т.е. разность потенциалов $E_{zv} = 0$, то между четырьмя сопротивлениями существует пропорция, которая и позволяет по 3-м известным сопротивлениям определить x ; действительно, мы имеем по условию одинаковости потенциалов в z и v ($E_{zv} = 0$)

$$E_{av} = E_{az} \text{ и } E_{zb} = E_{vb};$$

но, с другой стороны, если применить формулу Ома к каждому из четырех участков цепи,

$$i_1 = \frac{E_{av}}{r_1} = \frac{E_{zb}}{r_2}; \text{ т.е. } \frac{r_1}{r_2} = \frac{E_{av}}{E_{zb}},$$

а также

$$i_2 = \frac{E_{av}}{x} = \frac{E_{zb}}{r_3}, \text{ т.е. } \frac{x}{r_3} = \frac{E_{av}}{E_{zb}}.$$

Отсюда получаем, что $\frac{x}{r_3} = \frac{r_1}{r_2}$, как две величины порознь равные третьей; откуда

$$x = r_3 \frac{r_1}{r_2},$$

что и требовалось доказать. Чтобы узнать, что выполнено основное условие $E_{zv} = 0$, между точками z и v (в „мостике“) включают какой-нибудь чувствительный гальваноскоп G (показатель присутствия

тока); если гальваноскоп не показывает тока, то $E_{23} = 0$ с тем приближением, какое допускает чувствительность прибора. Сопротивление подбирают так: сперва задаются какими-нибудь r_1 и r_2 , а затем пробами подбирают r_3 таким, чтобы в мостике исчез ток.

Когда сопротивления должным образом подобраны, провод $z\delta$ может существовать или быть разомкнутым; от его удаления ничто не изменится; поэтому мы и предполагали при выводе теории уравновешенного моста, что ток в $z\delta$ тот же, что и в az (i_1), а в δb тот же, что в $a\delta$ (i_2).

Линейный мост Витстона основан на том, что, как видно из формулы, можно определить x , не зная r_1 и r_2 , а лишь отношение между ними; в линейном мосте сопротивления r_1 и r_2 представляют собою прямолинейную проволоку, вдоль которой скользит контакт z (рис. 13). Его двигают, задавшись сопротивлением r_3 , до тех пор, пока не получают $E_{23} = 0$; смещение z с этого положения влево даст при условиях рис. 13 в Γ ток от δ к z ; смещение вправо — от z к δ . Так как $r_1 = k \frac{l_1}{s}$, а $r_2 = k \frac{l_2}{s}$, где k и s суть удельное сопротивление и сечение всей проволоки ab , то $\frac{r_1}{r_2} = \frac{l_1}{l_2}$; а, следовательно, $x = r_3 \cdot \frac{l_1}{l_2}$.

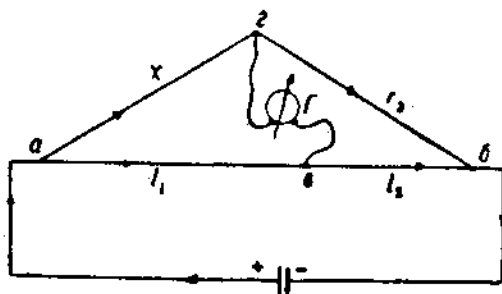


Рис. 13.

где k и s суть удельное сопротивление и сечение всей проволоки ab , то $\frac{r_1}{r_2} = \frac{l_1}{l_2}$; а, следовательно, $x = r_3 \cdot \frac{l_1}{l_2}$.

9. Заключение. В этой главе под E разумеется сила, толкающая электричество, дающая ему известную скорость (величина i) при данном сопротивлении. Это представление не противоречит тому, на котором построена глава I-ая; из всех других физических явлений известно, что чем больше напряжение энергии, тем быстрее она рассеивается (гл. I, § 6). Следовательно, E в законе Ома обозначает то же самое напряжение электрической энергии, ту же „энергию на единицу количества электричества“, которая трактуется в первой главе, только рассматриваемую с другой точки зрения: с точки зрения той скорости рассеяния энергии, которую она производит.

Мы расширили систему практических единиц еще на одну единицу: ом. Вся система представляется теперь в таком виде:

Единица времени —	<i>секунда</i>
„ энергии —	<i>джоуль</i>
„ мощности —	<i>ватт</i>
„ величины тока —	<i>ампер</i>
„ количества электричества —	<i>кулон</i>
„ эдс —	<i>вольт</i>
„ сопротивления —	<i>ом</i> .

Если все множители в каждой формуле будем брать в этих единицах, то всегда будем знать, какое именование имеет вся формула; она будет иметь соот. именование в единицах практической же системы.

10. Примеры. 1. Сопротивление 100 м медной проволоки в 1 мм² сечением равно 1,75 Ω. Каково сопротивление проволоки из того же материала длиной в 5 км и сечением в 1 см²?

Применяя к обоим случаям (форм. 12), имеем

$$r = k \frac{l_1}{s_1} \text{ и } x = k \frac{l_2}{s_2},$$

откуда

$$x : r = l_2 s_1 : l_1 s_2; \text{ т.-е. } x = 1,75 \cdot \frac{5000 \cdot 1}{100 \cdot 100} = 0,875 \Omega.$$

2. Сопротивление угля горящей (1000° Ц) 16 свечевой лампы накаливания равно 200 Ω. Каково его сопротивление при 0°?

$$R_0 = R_{1000} (1 - p \cdot 1000) = 260 \Omega.$$

3. Каким сопротивлением x нужно шунтировать гальванометр, сопротивление которого равно 30 Ω, чтобы через гальванометр всегда проходила $\frac{1}{100}$ полного тока в цепи (а, след., через шунт $\frac{99}{100}$)?

$$x : 30 = 1 : 99; x = 0,303 \Omega.$$

Таким шунтированием достигается „изменение шкалы“ гальванометра; он становится более грубым: если без шунта он может быть включен в цепь с током не большим 0,1 А, то с вышеуказанным шунтом он может быть включен в цепь до 10 А, при чем по нему попрежнему пойдет ток не более 0,1 А, выдерживаемый гальванометром. Постоянная шунта (стр. 44) в нашем случае близко равна 100.

4. Вычислить полное сопротивление цепи, представляемой схемой рис. 14 (цифры означают сопротивление в омах соответственных участков). Сначала определим приведенное сопротивление ответвлений:

$$r = \frac{1}{\frac{1}{1} + \frac{1}{1} + \frac{1}{4}} = \frac{4}{9} \Omega;$$

внешнее сопротивление

$$r_1 = 2 + 3 + \frac{4}{9} = 5\frac{4}{9} \Omega; r_2 = \frac{1}{2} \Omega;$$

полное сопротивление цепи $= 5\frac{17}{18} \Omega$.

5. Вычислить полезное действие электрической установки предыдущего примера; $a = 5\frac{4}{9} : 5\frac{17}{18} = 0,92$, или 92%.

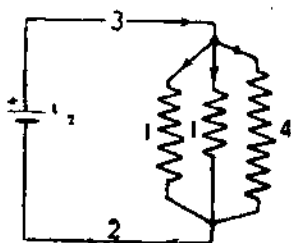


Рис. 14.

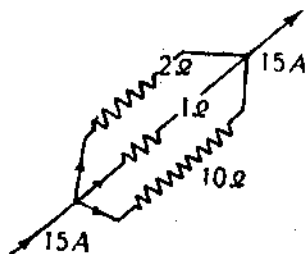


Рис. 15.

6. На какие токи разделяется 15 А в трех параллельных проводниках с сопротивлениями соответствующими 2, 1 и 10 Ω (рис. 15)?

Узнав приведенное сопротивление параллельных проводников ($\frac{5}{8} \Omega$) определяем падение потенциала у его концов по формуле (8¹); оно оказывается $9\frac{3}{8}$ В; пользуясь этой величиной, применяем затем закон Ома к каждому из проводников и находим искомые токи.

7. Как проверить эталон сопротивления помощью амперметра и калориметра?

ГЛАВА III.

ПРИМЕНЕНИЕ ДЖОУЛЕВА ТЕПЛА. УСТРОЙСТВО СЕТИ.

1. Электрическая грелка. В проводнике, по которому идет постоянный ток, выделяется в каждую секунду количество тепла, равное

$$i^2 R \text{ ваттов.}$$

Это тепло отчасти рассеивается с проводника в окружающие предметы и при том тем больше, чем менее изолирован этот проводник в тепловом отношении; остальное тепло накапливается в нем, повышая его температуру. *По мере повышения температуры рассеяние тепла как лучеиспусканием, так и конвекцией, все увеличивается* (ср. главу I, § 6) и, наконец, с проводника за каждую секунду будет рассеиваться столько же тепла, сколько его выделяется от тока. С этого момента температура перестает повышаться и будет удерживаться постоянной, пока не изменится i .

Если ток увеличится, то увеличится и температура нагреваемого им проводника, при которой опять же рассеивающаяся энергия будет равна поступающему джоулеву теплу.

Чем лучше изолирован проводник в тепловом отношении, чем труднее теряет он свое тепло, тем больше будет та его температура, при которой устанавливается стационарное равновесие между джоулевым нагреванием и рассеивающимся теплом. Так, если проводник находится в среде водорода или светильного газа, его температура будет ниже, чем если он находится в воздухе, при том же самом токе; в воздухе он может быть ярко раскален (необходимо взять платиновую проволоку, чтобы не произошло сгорания), в водороде же достигает едва красного каления; при этом включенный последовательно с ним амперметр показывает один и тот же ток. Это происходит, потому что водород и светильный газ, как более легкие газы, лучше проводят тепло, чем воздух. Проводник, находящийся на ветру, имеет меньшую температуру, чем в спокойном воздухе, при одинаковых

тока; этим можно пользоваться для измерения скорости ветра, измеряя сопротивление проводника, которое будет показывать его температуру.

Если перед плетеною сеткою из тонкой платиновой проволоки, по которой проходит небольшой ток, слегка нагревающий ее, говорить, то звуковые волны в воздухе будут ее периодически охлаждать. Как воздушные волны, так и происходящее от них охлаждение проволоки по продолжительности и по интенсивности будут строго соответствовать произносимым звукам. От изменения температуры платиновой проволоки будет изменяться ее сопротивление, а потому будет изменяться и ток в той цепи, в которую она включена (эдс генератора должна быть постоянной). Если эти изменения тока воспринять в телефон, приключенный где-либо в цепи, то ухо у телефона услышит речь, произносимую перед проволокой. При практическом осуществлении такого микрофона платиновая проволока служит передней стенкою ящика, в который входят звуковые волны, а иногда и резонатора, усиливающего эти волны.

Электрическая грелка представляет собою проводник, изолированный материалом, выдерживающим высокую температуру, например, асбестом. Будучи доведена до предельного раскаления, она рассеивает все образующееся в ней тепло, между прочим, и в то место, где помещается нагреваемый предмет. Отношение количества тепла, которое направляется к этому последнему, ко всему Джоулеву теплу называется отдачею грелки.

Вся теория этого простого прибора может быть выражена расчетом сопротивления R грелки, которая давала бы, например, 4 больших калорий в 5 минут, будучи поставлена под разность потенциалов 110 V. При этом положим, что ее отдача равна 50%. По закону Джоуля-Ленца можем написать:

$$0,5 \cdot i^2 R t = 4 \cdot 4180 \text{ дж.}$$

или, чтобы избежать вычисления тока, по закону Ома

$$0,5 \cdot \frac{E^2}{R} \cdot 5 \cdot 60 = 16\,720 \text{ дж.}$$

При $E = 110 \text{ V}$ получаем, что $R = 108 \Omega$.

2. Лампа накаливания состоит из стеклянного колпачка, в котором находится тонкая проводящая нить; концы этой нити соединены с металлическими электродами, впаянными в стекло и потому приготовленными из такого материала, коэффициент расширения которого

близок к коэффициенту расширения стекла. Эти электроды припаиваются к металлическим частям оправы, охватывающей узкую часть колпачка.

Изнутри колпачка воздух выкачан до большей степени разрежения, так-что нить, находясь в пространстве лишенном кислорода, не сгорает, а лишь накаливается. Отсюда лампа получила свое название.

Рассеяние тепла с нити лампы весьма затруднено тем, что она окружена безвоздушным пространством; тепло уходит с нее светом видимым и невидимым и через проводники, соединяющие ее с электрической цепью. Так как в этих местах происходит движение тепла по нити, то здесь устанавливается падение температуры (тепловой градиент); и, действительно, легко заметить на глаз, что у своих концов нить имеет все уменьшающуюся температуру, меньше раскалена. Это рассеяние становится равным скорости выделения джоулева тепла лишь при очень высокой температуре; нить накаливается более, чем на 1000°C . Процесс раскаления происходит, однако, весьма быстро вследствие ничтожной теплоемкости тонкой нити.

При этой температуре нить испускает яркий свет, который и характеризует нормально горящую лампу накаливания. Если напряжение, под которым находится лампа, меньше того, для которого она построена, то через нее пойдет меньший ток, и сила света ее будет слабее. Чувствительность угольной лампы к вольтам усугубляется еще тем, что с уменьшением температуры сопротивление угля возрастает, так-что при уменьшении вольт ток убывает не только от того, что E меньше, но и от увеличения сопротивления, происходящего от уменьшения тока.

В среднем, 16 свечевая угольная лампа, включенная под 100 V, пропускает через себя 0,5 A (т.-е. обладает сопротивлением в 200 Ω); отсюда получается, что на каждую свечу она потребляет $\frac{50}{16} = 3,1$ ватт.

Нельзя полагать, что световая мощность, представляемая одною свечью, и есть эти 3 ватта, — она в десятки раз менее: 95 или даже 99% мощности джоулева тепла рассеиваются лампою не в виде „света“, но в форме невидимых тепловых лучей и через отвод тепла с концов нити.

Лампы накаливания с *металлическими* нитями требуют меньше ватт на свечу, например, 1 ватт. Они менее чувствительны к изменению вольт, так как сопротивление металла уменьшается с уменьшением температуры. Этим же объясняется то кратковременное вспыхивание

металлической лампы, которое наблюдается в момент ее включения, пока нить еще только прогревается.

Большое значение такого свойства приемника электрической энергии — мало зависеть от колебания в вольтах — будет понятно, когда мы узнаем, как трудно устранить эти колебания (§ 10).

3. Вольтова дуга. Этот источник света представляет собою особую форму электрического тока через воздух между электродами, обыкновенно между угольными; для начала образования дуги ее углы должны быть сведены до прикосновения. Расстояние, на которое можно затем раздвигать углы без того, чтобы дуга потухла, зависит от разности потенциалов на углях. Это расстояние называется „длиною“ дуги; по большей части оно регулируется автоматически электромагнитным механизмом (регуляторы). Обычные дуги поддерживаются несколькими десятками вольт, представляя при этом ток в 10—50 А.

Сила света вольтовой дуги в зависимости от ваттов, поглощаемых ею, бывает от нескольких десятков до миллиона свечей. Температура ее около 3000° Ц. При питании дуги постоянным током концы ее электродов принимают особую форму (рис. 16): отрицательный уголь заостряется, а на положительном образуется впадина, называемая кратером. Положительный кратер является самым ярким местом всей дуги, его температура оказывается одною и тою же во всякой дуге, горящей при атмосферном давлении, а именно 3500° Ц.

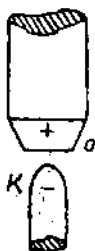


Рис. 16.

В учении о свете доказывается, что чем выше температура раскаленного тела, тем меньше энергии излучается им, как невидимый свет, на каждую свечу испускаемого им видимого света. Поэтому металлические лампы выгоднее угольных. Согласно этому же освещению вольтовой дугой гораздо, выгоднее, чем освещение лампами накаливания. Ее световая энергия равняется 10% Джоулева тепла, выделяющегося в ней.

Вольтова дуга часто употребляется для печей с наиболее высокой доступной температурой. С помощью такой печи, называемой Муассановской, готовят искусственные алмазы (из угля), рубины и т. д., а также добывают алюминий; в последнем случае электрические печи отличаются необыкновенно большой мощностью — до десятка тысяч киловатт; в такой печи горит дуга в тысячи ампер.

Вольтовая дуга применяется для электрической спайки и для заливки раковин металлов. В этом случае употребляется дуга и не между углями; одним из электродов является, например, металл,

которым заливают раковину, а другим — тот, поверхность которого желают сделать однородной (Славянов).

Наконец, особый вид вольтовой дуги представляет собою дуга между электродами из жидкой ртути (ртутная лампа). Она отличается богатством ультрафиолетовых лучей.

Замечательное явление вольтовой дуги было получено впервые почти одновременно: Вас. Петровым в Ленинграде и Дэви в Лондоне, около 1802 года.

4. Тепловые измерительные приборы. Тепловой амперметр заключает в себе тонкую проволоку ab (рис. 17), по которой проходит ток; через довольно короткое время (когда $i^2 R$, где R — сопротивление проволоки, равно скорости рассеяния тепла) температура проволоки достигает своей наибольшей величины, и длина ее соответственно возрастает. При удлинении проволоочки ab пружина p

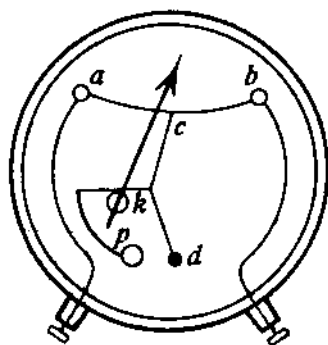


Рис. 17.

оттягивает проволоку cd , при чем блок k , а с ним и указатель, поворачивается на некоторый угол. Таким образом, указатель показывает удлинение, а следовательно, температуру проволоки, а значит, и ток. С помощью вольтметра прибор градуируется на амперы, т.-е. в тех местах шкалы, где останавливается указатель, обозначаются амперы, которые доводят его до этих мест. Тепловые амперметры, предназначенные для больших токов, снабжаются шунтом; в таком приборе только

малая часть тока направляется в тонкую проволочку прибора, а большая — в шунт. На шкале прибора наносится, однако, полный ток (ср. гл. V § 13).

Подобный же прибор может измерять и вольты; удлинение его проволоки, измеряя величину

$$i^2 R,$$

где R есть ее сопротивление, в то же время, можно сказать, измеряет и величину, равную вышенаписанной,

$$\frac{E^2}{R};$$

здесь E обозначает вольты, под которыми прибор находится. В приборах, предназначенных для измерения вольтов, *вольтметрах* на шкале наносятся уже не амперы, но вольты. Можно заметить, что хороший вольтметр градуируется не на те вольты, которые у его зажимов, но на те, которые у концов ab (рис. 17-б) проводников, служащих для присоединения вольтметра к цепи. Если заменить эти проводники другими, то, если говорить со всею точностью, градуировка вольтметра уже перестанет быть верною.

5. Включение амперметра и вольтметра. Обладая этими двумя обыкновенными приборами электроизмерительной техники, мы можем измерить все главнейшие величины, характеризующие простейший (постоянный) электрический ток в данной цепи или в каком-либо ее участке.

Положим, что нас интересует лампа накаливания L (рис. 17-а). Где-либо в тот провод, который ведет ток i к лампе или от нее, включается амперметр A ; он включается, значит, *последовательно* с лампой. В то же время *параллельно* ей включается вольтметр, который будет находиться, как параллельный проводник, под тем же напряжением, что и лампа, и своим показанием дает E лампы.

Вычислением мы находим затем сопротивление r лампы по найденным E и i ;

$$r = \frac{E}{i};$$

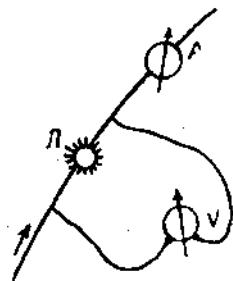


Рис. 17-а.

а также ватты, поглощаемые ею $= E \cdot i$.

Различие в способе включения амперметра и вольтметра налагает следующие условия для хорошей конструкции этих приборов. Они могут быть основаны на одном и том же принципе, как это мы видели на примере тепловых приборов; но амперметр должен обладать весьма малым сопротивлением, так как иначе включение его последовательно с другими проводниками в цепи значительно увеличит ее сопротивление, и сам прибор будет поглощать значительную мощность; вольтметр же должен быть по возможности большего сопротивления, чтобы он не отнял заметной части тока, который, как мы предполагаем, протекает весь по исследуемому проводнику (L на рис. 17-а); только при этом условии и вольтметр будет поглощать на себя мало энергии. Порядочный вольтметр, применяемый в 100-вольтовой цепи, должен иметь сопротивление не меньше

1000 ом; но и в этом случае необходимо помнить, что мы, включая прибор под все 100 V, пренебрегаем 0,1 A.

6. Измерение E_1 , E и E_2 помощью вольтметра. Включив вольтметр между точками a и b (рис. 17-б), мы измерим E_{ab} . Оставив одного зажим при a и отодвигая провод другого все дальше к c , мы измеряем все большую разность потенциалов. Включив,

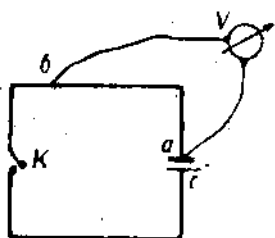


Рис. 17-б.

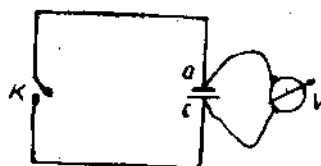


Рис. 17-в.

наконец, вольтметр между a и c , мы измерим всю внешнюю разность потенциалов E_1 (рис. 17-в).

Если же мы теперь уберем внешнюю цепь или, что то же, просто разомкнем ее ключом, то вольтметр покажет большую разность потенциалов; она будет приблизительно равна E . Это является следствием большого сопротивления вольтметра; действительно, внешнюю цепь теперь является вольтметр, не шунтированный никакой цепью поэтому отношение [форм. (13)]

$$\frac{E_1}{E} = \frac{r_1}{r_1 + r_2} = \frac{1}{1 + r_2/r_1}$$

весьма близко к единице, так как сопротивление вольтметра в сотни и даже тысячи раз больше сопротивления генератора; т.-е. E_1 , которое теперь дает вольтметр, весьма близко к E .

После того, как мы узнали E , мы можем узнать E_2 , имевшее место при замкнутом ключе (рис. 17-в), вычитанием [форм. (5)]:

$$E_2 = E - E_1.$$

7. Электрической сетью называется вся система проводов, соединяющих генератор с приемниками, т.-е. лампами накаливания, электродвигателями и т. д. Эти провода и представляют собою обычный способ передачи электрической энергии генератора; для постоянного тока это — единственный способ передачи энергии, но при переменных электрических процессах (электр. колебания) энергия может быть передаваема без проводов, прямо через промежуточное пространство подобно тому, как посылаются лучи света (глава XII).

Электрические провода состоят из проволок, тросов, кабелей, подвешиваемых на столбах или укладываемых в землю, тщательно изолируемых от земли, где это необходимо, и вообще от всех металлических, каменных, деревянных и т. п. предметов, соединенных с землей; они сравнительно легки, гибки, а главное — способ их действия не требует производить в них движения, так как электрический ток есть явление внутреннее. В этом последнем отношении электрическая передача энергии имеет громадное преимущество в сравнении с более старою — механическою, производимою помощью зубчатых сцеплений, штангов, бесконечных ремней или цепей.

Поэтому старый способ передачи энергии заменяется электрическим даже при небольших сравнительно расстояниях от генератора энергии до приемников, как, например, при передаче энергии от заводской паровой машины к отдельным станкам. Для больших расстояний, как десятки или сотни км, механическая передача, конечно, совсем неосуществима; исполнение подобных сооружений стало возможным лишь для электротехники.

Идея большой электрической установки заключается в следующем: генераторы ставятся в том месте, где наиболее дешево получается механическая энергия, превращающаяся в генераторе в электрическую, и где дешевле земля для постройки этой электрической станции; в идеальном случае, правда, довольно редком, таким местом является, например, берег водопада. Приемники устанавливаются, конечно, в населенных местах, где живут потребители. От станции к пунктам потребления идет „линия“, т. е. ведутся провода, называемые магистралями. Таким образом, получается схема, изображаемая на рис. 18.

Положим, что имеется три пункта потребления *A*, *B* и *C*, при одной магистрали. В эти места идут *ответвления*, питающиеся от *магистралей* независимо одно от другого; иными словами, если разомкнуть, например, цепь *B*, в нее не пойдет тока, но это не остановит питания двух остальных, остающихся в сообщении с магистралями. Каждое из ответвлений может заключать в себе несколько приемников, показанных на рис. кружками; и эти последние включаются, как ответвления, между двумя проводниками соответственной их цепи.

Такова схема (Эдисона) параллельного (независимого) включения какого угодно числа приемников в электрическую сеть.

8. Распределение энергии. Наше внимание будет обращено не к тому, чтобы вычислить (спроектировать) сеть, в которой было бы

выполнено заданное распределение энергии, но лишь к тому, чтобы понять, как эта энергия распределяется в данной установке.

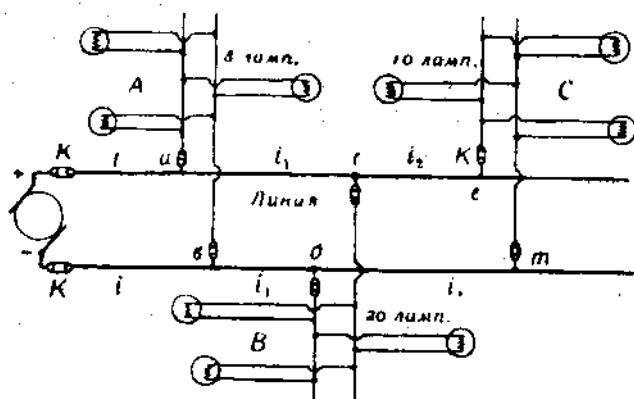


Рис. 18.

От станции идет ток i , питающий все приемники, например, лампы накаливания; он разветвляется в A , B и C , сообразно проводимостям этих ветвей; но все приемники включены параллельно, и, следовательно, проводимость ветви тем больше, чем большее число приемных аппаратов она заключает в себе. Следовательно, больший ток пойдет в ту ветвь, где большая потребность в токе, где больше включено ламп (на рис. 18 — в B). Отсюда следует, что система параллельного включения имеет свойство автоматически отвечать спросу потребителей.

В дальнейшем объясняется, что служит препятствием для точного выполнения такой роли.

Обратим внимание на одно существенное в практике отличие схемы рис. 18 от схемы, например, рис. 15. В последней все ответвления примыкают к одним и тем же двум общим точкам, тогда как A , B и C ответвляются от разных точек магистралей. Вследствие этого они находятся под разными напряжениями. Действительно, пусть генератор производит E вольт; когда идет ток, часть их E_2 теряется в нем самом; остальные вольты $E - E_2 = E_1$ идут на линию.

Проследим падение потенциала в магистралях от (—) зажима генератора, который заряжен, положим, до 100 V ; до точки a происходит падение потенциала равное по закону Ома

$$ir,$$

где r сопротивление первого участка магистрали. Пусть это падение равно $2 V$; в точке a имеем $98 V$; подобно этому в c имеем, например, $97 V$, в e — $96 V$.

Совершенно такое же падение потенциала происходит и в обратном проводе, от m к d , к b и K (—) зажиму. Пусть (—) зажим оказывается заряженным до $2 V$; тогда в a мы имеем $4 V$, в d — $5 V$, в m — $6 V$.

Таким образом, оказывается, что ветвь A находится под напряжением $E_{aa} = 98 - 4 = 94 V$, B — под $97 - 5 = 92 V$ и C — под $96 - 6 = 90 V$.

Отсюда понятно общее правило: то ответвление от магистрали находится под меньшим напряжением, которое отстоит дальше от генератора. Причина этого явления лежит всецело в падении потенциала вдоль магистралей.

Это падение тем меньше, чем меньше сопротивление магистрального кабеля и чем меньше ток i . Чтобы ослабить это явление при данном i , определяемом свойствами приемников, для магистрали применяют соответственный кабель с медными жилами большого сечения. Это особенно важно для первого участка, по которому идет наибольший (весь) ток i . Обыкновенно сопротивление магистралей выбирают таким, чтобы падение потенциала в линии не превосходило $3 - 5\%$ полного напряжения сети.

9. Колебания в нагрузке. Какой именно идет ток по различным участкам линии, рассчитывают таким образом: предположим к примеру, что каждая лампа накаливания пропускает чрез себя $0,5 A$; тогда сообразно указанию на рис. 18 мы скажем, что на всю установку идет $19 A$, из которых 4 ответвляется в A , 10 — в B и оставшиеся $5 A$ идут на C .

Идя навстречу необходимому явлению падения потенциала в магистралях, на практике включают иногда в пунктах, более отдаленных от станции, лампы накаливания, требующие для своей нормальной яркости меньше вольт, т.е. лампы меньшего сопротивления. Однако, подобный подбор ламп выполним лишь для определенного постоянного распределения приемников или, как говорят, для неизменной *нагрузки* сети.

В самом деле, достаточно представить себе, что в ответвлении C потушили все лампы; сопротивление всей сети увеличилось, так как она лишилась десяти ответвлений, *нагрузка уменьшилась*, ток i стал меньше; от этого падение потенциала в магистралях уменьшилось, так как стало меньше их ir (r магистрали — неизменно). Следо-

вательно, при тех же вольтах у зажимов генератора ¹⁾ напряжение в A и B поднялось, и подобранные нами лампы оказываются уже не вполне подходящими.

Обратно, всякое включение новых приемников, всякое увеличение нагрузки (и тока) сопровождается падением напряжения во всей сети, так как при этом увеличивается ir в магистрали.

Простейшим средством умалить колебания в напряжении от изменений в нагрузке остается уменьшение сопротивления в магистралях; им нужно придать такое малое r , чтобы при всяком i данной сети ir магистралей было бы пренебрежимо мало; конечно, это достижимо только при очень коротких линиях.

Обычную регулировку напряжения в сети является регулировка напряжения и самом генераторе, о которой будет сказано при описании динамомашинны.

10. Различные приспособления, относящиеся к устройству сети, описываются в книгах по практической электротехнике. Мы коснемся лишь одного вопроса, близко относящегося к тому, о чем только-что было изложено.

Мы говорили, что магистральные провода выбираются такого сопротивления, чтобы падение потенциала в линии не превосходило некоторой допустимой величины; тогда в различных ответвлениях вольты будут мало отличаться друг от друга. Для того же, чтобы ослабить значение колебаний в нагрузке, регулируется генератор.

Но могут случайно происходить столь большие увеличения в нагрузке, которые не входили в расчет при проектировании сети. Это бывает при *коротком замыкании*, когда провода, ведущие к какому-либо приемнику, например, к лампе накаливания, с сопротивлением в 200 Ω , соединяются помимо (параллельно) лампы проводником ничтожного сопротивления; при этом сопротивление цепи в десятки раз падает, и во столько же раз увеличивается ток. В этом случае дело идет уже не о том неудобстве, что упадет напряжение у магистралей, но о той опасности, которая возникает при чрезмерном нагревании проводов и при направлении большей части энергии на генератор (гл. II § 2).

Мы видели, что всякий проводник под постоянным током быстро достигает некоторой температуры, соответствующей величине тока.

¹⁾ Есть способ не позволить увеличиться напряжению у зажимов генератора при увеличении сопротивления внешней цепи (регулировка динамомашинны, VIII, 5).

Чрезмерное увеличение тока столь повышает его температуру, что расплавляется и загорается изолировка, является опасность пожара в окружающих предметах и расплавляется сам провод.

Чтобы воспрепятствовать току подняться до опасной величины, в провода включаются легкоплавкие предохранители (K на рис. 18); они представляют собою куски легкоплавкой проволоки, например, свинцовой, вводимые в цепь. Когда при коротком замыкании ток начинает повышаться за пределы нормальной нагрузки, предохранитель расплавится; вследствие этого цепь будет прервана и притом гораздо раньше, чем ток достигнет величины, опасной для сети.

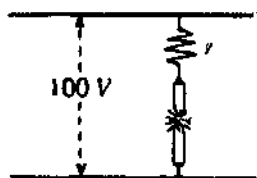


Рис. 19.

Предохранители изготавливаются на разное число амперов, т.-е. со свинцовой проволокой различной толщины; в ветвь A (рис. 18) включаются предохранители на $5A$, в B — на $12A$ и т. д.; кроме того, следует предохранить и саму линию, в нашем примере амперов на 25, на случай короткого замыкания между магистралями.

Вместо легкоплавких предохранителей нередко употребляются автоматические выключатели — электромагнитные приборы, механически размыкающие цепь, когда ток, идущий по ним, достигает некоторой предельной величины.

11. Примеры. 1. В 100-вольтовую цепь между магистралями желают включить вольтовую дугу, требующую для себя $30V$ и пропускающую $10A$. Какое сопротивление r (рис. 19) должно быть присоединено к вольтовой дуге?

Искомое сопротивление должно брать на себя $100 - 30 = 70V$ и притом пропускать $10A$, необходимых для дуги; отсюда получаем

$$r = \frac{70}{10} = 7 \Omega.$$

Интересно отметить, что этот реостат r будет поглощать $70 \cdot 10 = 700$ ватт, т.-е. в $2\frac{1}{3}$ раз большую мощность, чем сама дуга.

2. Узнать полную электро-движущую силу генератора, питающего 100 ламп (по $0,5A$), при сопротивлении линии $0,4 \Omega$ и сопротивлении генератора $0,5 \Omega$? Напряжение у ламп должно быть $110V$.

$$E = E_2 + E_1 = 50 \cdot 0,5 + 50 \cdot 0,4 + 110 = 155V.$$

Полезное действие этой установки (форм. 6) равно

$$\frac{110}{155} = 71\%.$$

3. С воздушной (на столбах) электрической проводки длиной в 2 км, если считать в один конец, а всего, следовательно, в 4 км, утекает в землю в сырую погоду 0,02 А.¹⁾ Среднее напряжение всей линии 200 В. Каково сопротивление изоляции на километр провода?

С каждого км утекает $\frac{0,02}{4}$ А; следовательно, сопротивление тех мест на одном км, через которые происходит утечка, равно

$$R = \frac{E}{i} = \frac{100 \cdot 4}{0,02} = 20\,000 \, \Omega.$$

Такое сопротивление изоляции на км воздушной проводки считается наименьшим допустимым.

Если на одном км двадцать столбов, то сопротивление каждого из них равно $20\,000 \times 20 = 40\,0000 \, \Omega$.

4. Как проверить вольтметр помощью верного амперметра и магазина сопротивлений?

¹⁾ Эта утечка происходит через изоляторы на столбах, вследствие их несовершенства, и далее чрез самые столбы в землю. Все эти столбы представляют собою параллельные провода, включенные между магистралью и землею. Чем больше столбов, тем меньше сопротивление изоляции.

ГЛАВА IV.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ.

1. Основные магнитные явления заключаются в следующем:

Магнитный стержень, магнит, будучи подвешен на нити, или поставлен на острие, устанавливается определенным образом, указывая в каждой точке земли некоторое определенное направление; так как, вообще говоря, магнит устанавливается приблизительно по линии север-юг, то один конец его, обращаящийся к северу, называется северным полюсом, другой — противоположный — южным.

Оба полюса магнита притягивают к себе железные предметы и, по закону противодействия, притягиваются ими.

Два магнитных стержня взаимно действуют своими полюсами; их одноименные, например, северные полюса, взаимно отталкиваются, разноименные — взаимно притягиваются.

Эти основные явления наблюдаются одинаково как с естественными магнитами, добываемыми из земли в виде кусков железной руды, так и с искусственными — приготовляемыми из стали. Стальной стержень может быть намагничен или помощью естественного магнита, или помощью электрического тока.

Давно уже было понято, что все перечисленные явления могут быть сведены к взаимодействию между полюсами.

При этом для объяснения определенной ориентировки магнита на земле необходимо только предположить, что земля есть тоже магнит, что ее „южный“ полюс находится где-то в северном полушарии, а „северный“ — в южном; тогда становится понятным, что вследствие притяжения этими полюсами разноименных полюсов магнита этот последний и устанавливается определенным образом.

Для объяснения же того, что к магнитному полюсу притягивается железо, нужно предположить, что железо состоит из молекул-магнитников; в железе, в его естественном состоянии, эти элементарные магниты никак не сказываются, так как они расположены в пол-

ном беспорядке (рис. 20); но под действием магнитного полюса, например, северного, эти магнитные молекулы обращаются к нему своими южными полюсами, и от него — северными; весь кусок железа получает, с одной стороны, северный полюс, с другой — южный (рис. 21),

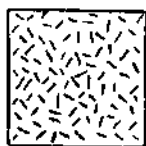


Рис. 20.

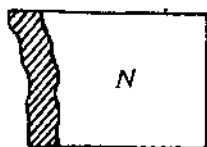
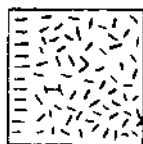


Рис. 21.



т.е. становится магнитом; таким образом и здесь происходит взаимодействие как бы двух магнитов.

Действительно, опыт показывает, что железо, находящееся под действием магнита, обнаруживает само все свойства магнита, т.е. способно притягивать железные предметы.

Будучи удалено от магнита, железо приходит вновь в свое естественное состояние; однако, некоторое время даже в самом мягком железе находится слабый *остаточный магнетизм*.

Сталь, хорошо закаленная, сохраняет магнитные свойства в большой мере и очень долгое время; между ее магнитными молекулами есть „задерживающая сила“.

Гипотеза элементарных магнитов хорошо объясняет свойство насыщения в железе.

Дело в том, что мы можем намагнитить его и более, и менее, действуя более или менее сильным магнитом, но можем намагнитить и до предела, до насыщения; по теории элементарных магнитов эти явления объясняются так: при слабом намагничивании лишь немногие из магнитных молекул железа становятся в порядок, при насыщении — все, после чего невозможно уже увеличивать магнитное состояние.

2. Количество магнетизма; закон Кулона. Что же такое это взаимодействие между полюсами, к которому мы свели основные магнитные явления? В науке к XIX в. установилось представление, что причиною его служит особое вещество, магнетизм, имеющееся в природе в двух видах — „северный“ и „южный“, и находящееся в полюсах магнитов или магнитных молекул. Эти два вида магнитного вещества и обладают удивительным свойством взаимно притягиваться, если они разноименные, и отталкиваться в противоположном случае.

В сущности тут не дается никакого объяснения, так как первоначальный вопрос только переносится, совершенно неразрешенный, с магнитных полюсов на вещества, находящиеся в них; почему они притягиваются или отталкиваются? Но весьма удобно говорить о веществе, чтобы перейти к измерению явления.

Что бы ни было магнитное вещество, но оно может быть в большем или меньшем количестве; этим выражается тот факт, что магнитные полюса бывают более сильными по своим действиям и более слабыми.

Если полюса двух магнитов оказываются одинаково сильными, то количество магнетизма в них одинаково. Вдвое более сильный магнит обладает двойным количеством магнетизма и т. д.

Отсюда уже один шаг к тому, чтобы измерять количество магнетизма, сравнивая магниты по их внешним действиям; необходимо лишь условиться, принять какое-либо количество за единичное.

Мы видели, что первичным между всеми магнитными действиями является взаимодействие между полюсами. Из опыта известно (Кулон, 1789 г.), что сила этого взаимодействия (F) прямо пропорциональна произведению количеств магнетизма (m и m_1) и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между полюсами,¹⁾ т.-е.

$$F = \frac{m \cdot m_1}{r^2}.$$

Закон этот относится одинаково как к притяжению, так и к отталкиванию.

Чтобы узнать, сколько магнетизма в данном полюсе, следует взять другой, равной силы ($m = m_1$), измерить F при известном r и решить уравнение:

$$m = r\sqrt{F}. \quad (14)$$

3. Единица магнетизма; система CGS. Если при вычислении вышенаписанной формулы мы получим $m = 1$, то измерявшееся количество магнетизма и есть единичное.

Разумеется, результат будет зависеть от того, в каких единицах измерены F и r . Чтобы не поступать просто по прихоти, измерения производятся в какой-либо системе. Мы познакомились уже с практической системой; но она непригодна в данном случае; она употребляется исключительно для электрических величин, здесь же дело идет о длине и силе. Когда требуется выражать длины, силы и т. д.,

¹⁾ Полюса разумеются в виде точек.

пользуются более основной, универсальной системой, называемой CGS система. В ней длины измеряются в *сантиметрах* и силы в *динах*. Дина равна $\frac{1}{980}$ г-веса, или приibl. $\frac{1}{1000}$ г-веса.

Остановившись на этих единицах, мы должны принять за единичное количество магнетизма такое, для которого формула (14) даст единицу при r , измеренном в см, и F — в динах. Так, например, *если магнитный полюс притягивает или отталкивает другой полюс, равный ему, находящийся на расстоянии в 1 см, с силою в 1 дина, то он есть единичный* (в нем единичное количество магнетизма).

Эта единица количества магнетизма в нашем курсе важна не сама по себе, но по тому громадному значению, которое она играет при измерении электрических величин.

4. Магнитное поле; напряжение поля. Пространство вокруг магнита называется магнитным полем; когда в это пространство введены магниты, то на них действуют силы тем большие, чем больше количества магнетизма, заключенные в полюсах этих магнитов.

Магнитное поле определяется этими силами, т.-е. тем, каковы они в каждой точке поля, какова их величина и направление. Но, как мы только-что сказали, эти силы в каждой точке могут быть бесконечно *разнообразны* по величине (но не по направлению, см. ниже), смотря по тому, какое количество магнетизма помещено в эту точку. Если, например, на единичный полюс действует в данной точке сила в 5 дин, то полюс в 10 раз больший в той же точке окажется под действием 50 дин, ибо каждая его единица будет испытывать силу в пять дин.

Поэтому магнитное поле характеризуется следующим образом: в каждой его точке существует известное напряжение определенной величины и определенного направления. Это напряжение мы будем обозначать буквой H . Его нужно помножить на количество магнетизма m , чтобы узнать, с какою силою F действует поле на наш полюс m , помещенный в этой точке:

$$F = Hm. \quad (15)$$

H измеряется в системе CGS, точно так же как и m , и потому F получается из уравнения (15) в динах.

H не может быть измеряемо в динах, так как это есть:

$$H = \frac{F}{m},$$

т.-е. сила, деленная на колич. магнетизма, величина совсем особого рода. Физический смысл „напряжения поля“ выясняется в следующем параграфе.

При $m=1$, H численно равно F ; иными словами, напряжение поля численно, но не по смыслу, равно силе, с которой поле действует на ед. магнетизма. Если на единичный CGS полюс действует сила в 1 дину, то H равно единице в CGS системе (один гаусс).

Для всякого магнитного поля можно построить чертеж, с помощью которого легко определить с известною точностью величину и направление H для всякой точки поля в плоскости чертежа. Для этой цели проводят так называемые *силовые линии*.

Положим, что мы интересуемся полем от прямолинейного магнита NS (рис. 22); обратимся к точке a ; если в ней находится северное количество магнетизма m , а в полюсах магнита по одинаковому количеству m_1 , то закон Кулона дает нам силы взаимодействия между этими полюсами и m , которые мы и откладываем в должном направлении по линиям aN и aS ; их равнодействующая

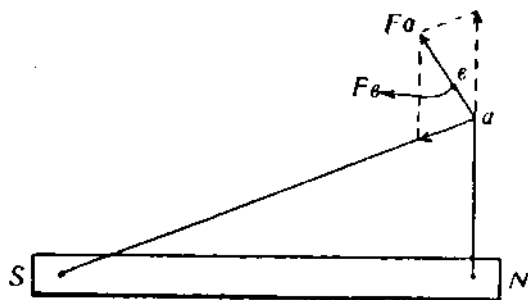


Рис. 22.

и будет силою поля, действующею на наше количество магнетизма m . Если это последнее мы изменим, то во столько же раз изменятся, по закону Кулона, обе стороны параллелограмма сил, сохраняя, однако, свое направление по aN и aS ; во столько же раз изменится и их равнодействующая, но направление ее останется тем же, как диагональ подобного параллелограмма.

По той же причине не отзовется на направлении этой равнодействующей и изменение количества магнетизма m_1 в полюсах магнита.

Таким образом, направление Fa зависит лишь от мест расположения полюсов магнита и точки a .

Теперь вообразим, что m может свободно двигаться; оно пойдет из точки a по направлению действующей на него силы; но в ближайшей же точке b своего пути оно окажется под действием другой силы, так как расстояние от N увеличится, а от S — умень-

шится; равнодействующая F окажется направленной более к южному полюсу. Повторяя дальше то же рассуждение, мы проследим весь путь m , который, наконец, закончится у южного конца магнита; начало этого пути можно считать у северного полюса.

Этот путь будет построен тем вернее, чем меньше участки ab мы будем брать, на которых считаем, что направление силы не изменяется. Он будет вполне верен, если мы возьмем их бесконечно малыми (помощью дифференциального исчисления); тогда мы получим кривые линии (рис. 23), направляющиеся от N — полюса магнита к его S — полюсу. Это и будут силовые линии. Мы видим из способа построения, что кривая, выражающая силовую линию, совсем не зависит ни от m , ни от m_1 .

Так как точка, движущаяся по кривой линии, в каждом элементе своего пути движется по касательной, то направление силы поля в какой либо-точке узнается, как касательная к той силовой линии, которая через эту точку проходит. Если, как, например, в точке c (рис. 23), силовой линии как раз не имеется, ибо их не может

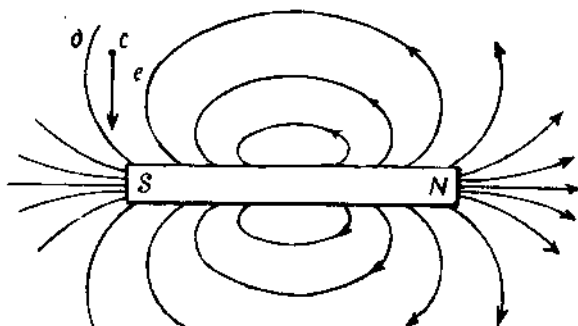


Рис. 23.

быть начерчено бесконечно много, то направление силы определяется, как среднее между направлениями сил в ближайших точках d и e .

Мы видим, что силовая линия может дать только направление силы. Чтобы узнать ее величину, пользуются тем, что величина силы пропорциональна густоте силовых линий; действительно, силовые линии сгущаются к тем местам, где поле сильнее, при приближении к полюсу, к которому они сходятся; они разрежаются по мере удаления от полюса. Условились проводить силовые линии в таком числе, чтобы через каждый кв. см площадки перпендикулярной

к ним ¹⁾ их проходило столько, скольким единицам равно H , напряжение поля в данной точке.

Зная H , по формуле (15) можно определить F по данному m . Величина m , входит уже в H , т.е. выражается густотой силовых линий.

Южный магнетизм m будет стремиться двигаться не по тому направлению, которое указано стрелками на силовых линиях (рис. 23), но — по обратному.

Нельзя получить отдельно северный или южный магнетизм; мы имеем дело всегда с магнитами, имеющими оба полюса с одним и тем же m (см. ниже). Такой магнит, помещенный в поле, будет находиться под действием двух сил — на два его полюса; результаты этого могут быть весьма разнообразными. Мы обратим внимание на тот предельный случай, когда магнит весьма короток, например, железная опилка; когда такая опилка достаточно удалена от N и от S , мы можем считать, что оба ее полюса испытывают одинаковые силы со стороны магнита; они находятся как бы в одной и той же точке его поля, потому что расстояние между ними ничтожно в сравнении с расстояниями от полюсов; поэтому такая опилка лишь установится вдоль силовой линии под действием одинаковых противоположно направленных сил, но не будет двигаться ни к одному из полюсов.

Вот почему, насыпав железных опилок на бумагу, положенную на магнит, мы увидим, что опилки расположатся по линиям рис. 23; только те, которые находятся в непосредственной близости к N и S , подвинутся к ним вплотную; у остальных движущая сила будет так мала, что трение о бумагу будет достаточным ей противодействием.

Чертеж, даваемый железными опилками, называется магнитным спектром.

Всякий магнит, хотя бы и весьма длинный, в поле земного магнетизма в наших широтах играет роль опилки в поле магнита. Он всегда столь короток в сравнении с расстояниями до полюсов, что лишь устанавливается по силовой линии, но не обнаруживает стремления двигаться вдоль нее. Точные наблюдения над этим фактом служат, обратно, доказательством того, что во всяком магните в точности одно и то же количество магнетизма в обоих полюсах; если бы

¹⁾ Необходимо представить рис. 23, как сечение плоскостью бумаги поля, охватывающего магнит со всех сторон.

в одном полюсе магнита было больше магнетизма, чем в другом, действие земли на первый полюс было бы сильнее, и при достаточно малом трении магнит задвигался бы вдоль земной поверхности под действием этой большей силы.

Б. Магнитный поток; магнитная проницаемость. Мы наполняем пространство вокруг магнита силовыми линиями, приписываем каждой его точке известное напряжение (H), которое позволяет определить силу, действующую на колич. магнетизма, помещенное в этой точке. Однако, все это — только математические построения; никакого явления в пространстве мы не предполагали; и силы, и напряжения поля происходят единственно от действия полюсов магнита, прямо через пространство, на колич. магнетизма, помещенное в поле; это явствует из самого способа наших выводов.

Такое рассуждение называется теориею действия *на расстоянии*; и в законе Кулона количества магнетизма взаимодействуют чрез расстояние; то, что находится между ними, т.-е. промежуточная среда, не играет никакой роли; она может быть хоть отвлеченную пустотою.

Но гораздо более ясна противоположная теория Фарадея, установленная этим ученым в первой половине XIX века и основывающаяся на том, что не может тело (напр., магнитный полюс) действовать в том месте, где его нет; что тело может действовать только на такой предмет, который оно охватывает или с которым оно соприкасается. Это — теория *близкодействия*.

С ее точки, зрения вокруг магнита *происходит* (существует) магнитный поток; все магнитные явления объясняются теми действиями, которые производит этот поток на погруженные в него тела.

По этой теории рис. 23 изображает магнитный поток, образуемый магнитным стержнем. Есть ли это действительное течение, а силовые линии — отдельные его струйки, или это — вихревое состояние среды, а силовые линии — оси отдельных вихрей, крутящихся вокруг них, или это — статическое состояние — какая-нибудь деформация среды, сдвиг вдоль силовых линий, все это остается нерешенным. Мы увидим, какой громадный шаг вперед представляет собою одна идея о магнитном потоке даже без того, чтобы мы могли воплотить ее в какую-либо реальную картину. Подобно этому простые идеи о колич. электричества и колич. магнетизма позволили уже нам многое понять и измерить в соответствующих явлениях.

Обратимся же к свойствам магнитного потока, насколько они выступают на опыте.

А. Магнитный поток всегда замкнут на самого себя. Действительно, магниты существуют десятки и сотни лет: их энергия практически не уменьшается; они не рассеивают энергии; следовательно, практически весь их поток всегда при них же и остается. Условно мы называем северным полюсом место выхода потока, а южным — место его возвращения в магнит; с этого места поток проходит по магниту к N , таким образом завершается его замкнутый путь. Количество магнетизма в полюсе и является мерою выходящего или входящего потока; непременно существуют два полюса у каждого магнита, потому что поток, вышедший из магнита (N — полюс), непременно вернется в него (S — полюс). Оба полюса обладают одинаковым количеством магнетизма, потому что *весь* поток, вышедший из N , вернется в S . Таким образом, обязательное существование двух полюсов ¹⁾ с равными m является лучшей иллюстрацией замкнутости потока.

Если бы мы решились делать выводы по теории дальнего действия, исходя из представления о магнитных жидкостях, мы могли бы считать возможным тело, намагниченное одною северною жидкостью или имеющее два полюса не равной силы.

Б. Магнитный поток проходит по наименьшему сопротивлению для себя. Под сопротивлением, как и в электричестве, мы разумеем

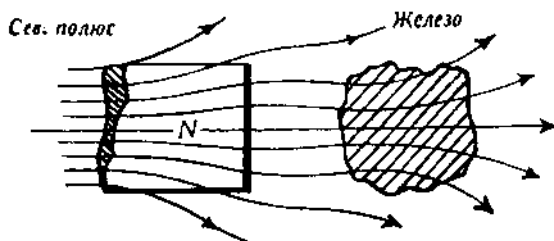


Рис. 24.

величину пропорциональную длине и обратно пропорциональную сечению того тела, чрез которое проходит магнитный поток. Один

¹⁾ Свойству (А) не противоречит существование магнитов с тремя полюсами, напр., одним северным и двумя южными, между которыми и распределяется входящий поток; и в таком магните количества сев. и южного магнетизма будут одинаковы.

взгляд на рис. 23 уже поясняет все дело; поток тотчас же по выходе из магнита расширяется все более и более, получая таким образом наибольшее возможное сечение, и снова сжимается лишь для того, чтобы войти в сталь магнитного стержня.

Если мы поднесем к магнитному полюсу кусок железа, железные опилки покажут приблизит. такое изменение в форме магнитного потока, какое изображено на рис. 24. Сравнение этого рис. с рис. 23 ясно показывает различие точек зрения двух теорий: теперь магнит и железо являются связанными магнитным потоком, и те же, как и на рис. 23, полюсы, появившиеся на железе, расматриваются, как места входа и выхода потока.

Но мы видим, что магнитный поток получил большую длину и, местами, меньшее сечение, чем имел на рис. 23 в том же месте. Где же в этом явлении находится причина, объясняющая его с точки зрения высказанного свойства (Б) магнитного потока? Мы знаем, что сопротивление зависит не только от геометрических размеров самого пути, но и от того вещества, которое заполняет его. Рис. 24 получает полное объяснение, если железо имеет такую большую удельную проводимость для магнитного потока в сравнении с воздухом, находящимся вокруг него, что делает более легким прохождение потока даже при условии более длинного и узкого пути.

Удельная проводимость для магнитного потока называется магнитною *проницаемостью* (μ); она вычисляется относительно пустоты, т.е. всемирного эфира, или приближенно — относительно воздуха. У железа проницаемость выражается числом в несколько сотен и даже тысячами; за ним следуют кобальт и никкель; многие сплавы из тел, не отличающихся большою проницаемостью, оказываются весьма проницаемыми, как, например, сплавы Cu , Mg и Al , взятые в определенных пропорциях.

У тел подобных железу, называемых ферромагнитными, проницаемость испытывает резкое изменение при определенной температуре; для железа около 780°C она убывает сразу до 1; для Ni — около 390°C ; для Co — около 1000°C . Как пример обратного явления, увеличение μ с уменьшением температуры, можно привести жидкий воздух (-180°C), проницаемость которого во много раз превосходит μ газообразного воздуха.

Проницаемость железа зависит и от того H , в котором железо находится; при некотором H она обращается в единицу (насыщение).

Понятие о проницаемости приводит к следующей формуле для магн. сопротивления какого-либо тела, длиной L , сечением s , с проницаемостью μ :

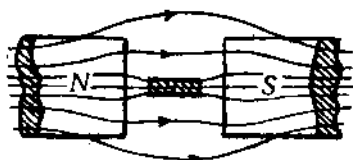
$$\text{Магн. сопротивление} = \frac{L}{\mu s}.$$

В. Все механические действия магнитного поля объясняются силами, с которыми поток действует на погруженные в него тела, при чем результатом этих действий является уменьшение сопротивления потоку.

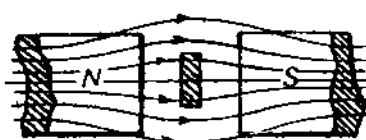
Чтобы пояснить это, проследим типичнейшие из механических действий магнита.

Железо притягивается магнитом. Мы видели (рис. 24), как присутствие железа вблизи полюса изменяет линии магнитного потока. Магнитный спектр (рис. 24) показывает, что большая проницаемость железа покрывает то увеличение сопротивления потока, которое происходит от удлинения потока (в противном случае поток не зашел бы в железо); но несомненно, что сопротивление потока станет еще меньше, когда железо приблизится к полюсу, и поток укоротится. Следовательно, притяжение железа магнитом имеет своим следствием уменьшение сопротивления потока.

То же самое относится и к двум магнитам, обращенным друг к другу противоположными полюсами (рис. 26-б).



Железо.
Рис. 25-а.



Висмут.
Рис. 25-б.

Если между полюсами сильного магнита подвесить какое-либо тело удлиненной формы, то оно установится своею длиною вдоль потока, если его проницаемость больше, чем у окружающей среды; при таком положении этого тела (рис. 25-а) поток большей частью своей длины проходит через тело с большою μ . Если подобным же образом подвесить тело с проницаемостью меньшею, чем у среды, то оно устанавливается своею длиною поперек силовых линий: при таком положении магнитный поток проходит чрез это тело наименее длинный путь при наибольшем сечении (рис. 25-б). Это явление представляет собою простейший способ узнать хара-

ктер проницаемости какого-либо тела; ¹⁾ сила, с которою тело стремится установиться вдоль потока или поперек, и измеряет разность проницаемостей исследуемого тела и окружающей его среды. Тела, имеющие μ большую, чем пустота, называются парамагнитными; тела же, обладающие меньшей μ , чем пустота, называются диамагнитными; из них особенно замечателен висмут: его $\mu = 0,9998$.

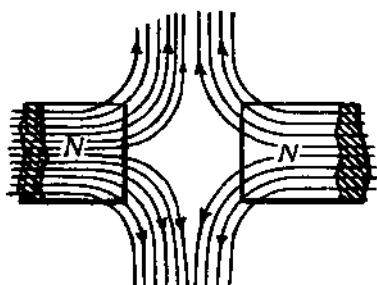


Рис. 26-а.

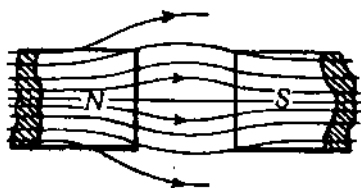


Рис. 26-б.

Два магнита, обращенные друг к другу одноименными полюсами (рис. 26-а), производят такие потоки, которые не могут слиться в один, стать продолжением один другого; они идут рядом, и тем более стесняют друг друга, чем меньше расстояние между полюсами и чем сильнее потоки. ²⁾ Полюса взаимно расталкиваются, при чем потоки получают большие сечения, т.-е. меньшее сопротивление. Сила, с которою отталкиваются полюса, тем больше, чем ближе друг к другу полюсные оконечности и чем больше в полюсах количества магнетизма. Свойство (В) тут очевидно подтверждается. Такое же явление (только в слабой степени) имеет место, если к полюсу магнита приближать кусок висмута; магнитный поток этого полюса, избегая висмут, принимает форму половины рис. 26-а; отсюда происходит отталкивание висмута от магнита, сопровождающееся расширением потока.

Таким образом всевозможные явления магнитных отталкиваний и притяжений объясняются стремлением потока пройти через тело луч-

¹⁾ Эти опыты показали, что в достаточно сильном поле все тела так или иначе испытывают на себе действие потока. Говорить, что магнит притягивает к себе только железо, можно лишь в смысле указания на особенно большую проницаемость железа, позволяющую определить его магнитность даже в слабом поле.

²⁾ На рис. 26-а представлены полюса неодинаковой силы; поток правого полюса слабее, чем левого.

шей проницаемости, затем укоротиться и расшириться. Теперь наши силовые линии, как элементы физического процесса — потока, наделяются свойствами совсем негеометрического характера; они стремятся укоротиться (продольное стягивание) и разойтись (боковой распор). Эти свойства, особенно последнее, трудно укладываются в представление о „линиях“, а потому Фарадей представляет себе элементы потока в виде трубок, стенки которых образованы из силовых линий. Объяснение тех же явлений, как дальностей между полюсами, кажется, дает более легкий способ *вычислить* силы взаимодействия; но нужно иметь в виду, что закон Кулона в своей простой форме относится лишь к полюсам в виде точек; применение же его к действительным полюсам магнитов (ср. рис. 23, 24, 26) оказывается весьма сложною задачею, так как они представляют собою целые поверхности с различными количествами магнетизма в различных точках.

Величина H , которою мы пользовались выше, с точки зрения магнитного потока представляет собою густоту потока или, говоря образно, — число струек потока, проходящих через единицу поверхности.

6. Глубокое значение теории магнитного потока. Поток индукции и силовой поток. Может казаться странным утверждение, что магнитный поток проходит через наименьшее сопротивление, а особенно — что он так передвигает тела, чтобы получить наименьшее сопротивление; будто, магнитный поток может рассуждать. На самом же деле эта сторона учения о потоке именно и служит к сближению науки о магнетизме с общими принципами, открытыми в основе всех точно известных явлений физического мира, и дает, следовательно, прочное основание нашим представлениям о магнитных процессах.

Действительно, все в природе совершается наилегчайшим путем магнитный поток также идет по пути с наименьшим сопротивлением. Все явления представляют собою рассеяние энергии, заложенной в телах. Всегда силы оказываются приложенными к телам, препятствующим исполнению этих принципов; так, например, шар, скатывающийся по наклонной плоскости, давит на предмет, который мешает ему катиться по кратчайшему пути; груз давит на подставку, мешающую ему рассеять свою потенциальную энергию в падении вниз.

Всякое приближение железа к магнитному полюсу есть уже уменьшение энергии магнитного потока, так как при этом приближении

совершается работа со стороны магнита, притягивающего железо к себе. Магнитный поток, укорачиваясь, рассеивает свою энергию.

Точно также, следовательно, и самое вхождение потока частью своею в железо (рис. 24) уже представляет собою рассеяние энергии поля; иначе это явление не имело бы места. Мы должны, следовательно, признать, что большая проницаемость это есть способность — в значительной степени ослабить магнитный поток.

Это можно пояснить и другим образом. Мы знаем, что поток стремится расшириться, и это стремление тем больше, чем он более сгущен. Поток обладает боковым распором тем большим, чем он гуще. Каким же образом может быть равновесие в этом стремлении (равновесие этих боковых распоров) в сгущенном потоке железа и разреженном потоке окружающего воздуха (рис. 24)?

Равновесие становится понятным, если установить, что более сгущенный поток в железе изображает собою то же напряжение, что менее сгущенный в воздухе, и потому обладает теми же силами бокового распора; что два одинаковых по густоте потока — один в железе, другой в воздухе — далеко не одинаковы по своим силам; первый в μ раз слабее второго.

Вот почему закон Кулона нуждается в существенной поправке; два полюса с количеством магнетизма m и m_1 , т.-е. соединенные потоком соответственной густоты, взаимно притягиваются с различной силой, смотря по тому, в какой среде находится их магнитный поток; эта сила тем меньше, чем больше μ этой среды. Таким образом, закон Кулона получает вид:

$$F = \frac{m \cdot m_1}{\mu r^2},$$

который и подтверждается опытами.

Итак, имея пред собою магнитный поток, мы должны различать его *количество* (сколько в нем элементов — струек, линий или так называемых „фарадеевских трубок“), определяемое количествами магнетизма, образующими поток, и его *качество*, т.-е. какие магнитные силы представляет он в том или другом месте; это последнее зависит от среды, от того тела, в котором поток прокладывает свой путь.

Так как магнитные силы также изображаются помощью линий (силовых) и измеряются их густотой (см. стр. 70 и 77), то у нас в одном и том же магнитном поле получаются две системы линий, одна — изображающая „количество“, другая — „качество“.

Чтобы избежать какой-либо путаницы, будем представлять себе дело таким образом: те линии, которые изображают поток по его количеству, будем называть линиями магнитной индукции и весь их комплекс — *потоком* (магнитной) *индукции*.

Линии же, изображающие магнитные силы, составляют *силовой поток*.

Если густоту потока индукции в каком-либо месте магнитного поля обозначим через B , то согласно сказанного в этом параграфе, если это поле проходит по среде с проницаемостью μ , густота силового потока в том же месте, т.-е. напряжение магнитного поля, равна

$$H = \frac{B}{\mu}.$$

Если $\mu = 1$, как, например, приблизительно в воздухе, то H численно равно B ; оба потока совпадают друг с другом.

Нелишним будет привести аналогию из других областей физики, поясняющую различие этих двух магнитных потоков. Мы можем произвести одинаковые деформации в различных телах, например, одинаковое растяжение, закручивание; допустим, что все эти деформированные тела имеют совершенно одинаковые геометрические размеры. С точки зрения деформации, геометрической количественности явления будут тождественны; но если обратить внимание на те силы, которые мы вызвали в телах, силы упругости, на работу, которую затратили при деформировании, энергию, которую заложили этим деформированием, то окажется, что явления могут быть весьма различными: растянутая резина обнаруживает ничтожную силу упругости, а на столько же растянутый такой же стальной брусок — громадную.

Следовательно, и при явлениях деформации нам приходится различать количество и качество.

Второй пример может быть приведен из динамики. Два ветра или два вихревых движения, одинаковые по объему и по скоростям, весьма различны по своей энергии, если различны массы частиц, составляющих то или иное тело.

Подобно тому, как H измеряется в *гауссах* при CGS-ной системе измерений, B в той же системе измеряется в *максвеллах*.

Если в какой-либо части пространства, во всех точках B одно и то же, то чрез сечение в s кв см, перпендикулярное потоку, проходит

$$\Phi = Bs = \mu Hs$$

линий индукции. Эта величина называется полным потоком чрез данную поверхность.

Разделение понятия о потоке на два, о потоке индукции и силовом, повторяется, как увидим ниже, и в учении об электрическом поле (глава IX).

7. Намагничивание. В нашем изложении распределение магнитного потока и все его действия рассматриваются, как результат проницаемости тел, находящихся на его пути. Недостатком этой теории является необъяснимость того последствия, которое оставляет после себя магнитный поток, например, в железе (остаточный магнетизм). Проницаемость в роде электрической проводимости представляется каким-то пассивным свойством, не могущим оставить в теле следов своего действия.

Поэтому теория элементарных магнитов (стр. 65) вполне сохраняет свое место и в настоящее время. Вследствие определенной ориентировки этих магнитов парамагнитное тело приобретает полюса, становится намагниченным; это намагничивание J принимается пропорциональным действующему полю H ; $J = kH$; k называется коэффициентом намагничивания. Теория дает такую формулу перехода от намагничивания к проницаемости:

$$\mu = 1 + 4\pi k.$$

У диамагнитных тел k отрицательно, μ меньше единицы; у ферромагнитных, как железо, k изменяется с изменением H ; при малых напряжениях поля оно растет, например, до $H = 4,2$ гаусса, при котором $k = 210$ ($\mu = 12,5 \cdot 210$); затем оно убывает сначала быстро — потом медленнее, достигая при $H = 22$ гаусса величины $k = 60$; железо приближается к насыщению ($\mu = 1$). Цифры эти зависят от сорта железа. Прибавление к железу кремния весьма увеличивает k ; наоборот, прибавление марганца в количестве 4% уменьшает k в четыре раза; при 8% — в 20 раз, при 12% k почти равно нулю.

Тепловое междучастичное движение, сопровождающееся соударениями молекул, разбивает правильные ряды элементарных магнитов; поэтому следует ожидать, что с повышением температуры они унаправляются с большим затруднением, k уменьшается. Это явление особенно просто выражается в телах „парамагнитных“, у которых k обратно пропорционально абсолютной температуре (T), т.-е. $kT = \text{const.}$ Для тел ферромагнитных закономерность очень сложна (см. стр. 74). У диамагнитных k не зависит от температуры.

Остаточный магнетизм происходит, от того что общее поле выстроившихся уже элементарных магнитов само удерживает каждый отдельный элементарный магнит, несмотря на его участие в междучастичном движении, в некоторой средней ориентировке, когда ориентирующее внешнее поле уже убрано. Это явление очень сложно. В железе все те примеси (марганец, хром, вольфрам), которые уменьшают k , затрудняют намагничивание, увеличивают остаточный магнетизм, т.е. затрудняют и размагничивание.

Приведем значение k для некоторых пара-и диамагнитных тел. Все k в приводимой таблице увеличены в миллион раз.

Кислород (твердый)	+ 422	Дерево (средн.)	— 0,3
Марганец	+ 78	Медь	— 0,88
Окись железа	+ 50	Сера	— 0,89
Хром	+ 24	Стекло	— 0,9
Калий	+ 0,5	Цинк	— 1,04
Кислород (жидкий)	+ 254	Серебро	— 1,76
Медный купорос	+ 1	Золото	— 2,8
Кислород (газ)	+ 0,142	Висмут	— 14,2
Воздух (газ)	+ 0,030	Вода	— 0,73
Азот (газ)	+ 0,001	Ртуть	— 2,3

Если в магнитное поле, образовавшееся в воздухе от каких-либо причин (магниты и токи), внесем тело с проницаемостью отличною от проницаемости воздуха, то во всех точках этого поля магнитные силы изменяются как по величине, так и по направлению. С какой точки зрения мы будем рассматривать это явление, с помощью понятия о потоке индукции и магнитной проницаемости (B и μ) или с помощью понятия о намагничивании (H и k), это — в большой мере дело вкуса. Идея о сгущении или разрежении потока индукции в том месте, куда внесено тело, и идея о намагничивании его должны привести к одинаковым результатам в подсчете тех изменений во всех точках поля, которые произведет внесенное тело.

Метод „намагничивания“ особенно силен, если приходится рассматривать значение геометрической формы внесенного тела, так как намагничивание проявляется на поверхности его и будет, следовательно, определяться ее геометрическими свойствами.

Понятию об элементарном магните стремятся теперь придать большую определенность; его представляют, как некоторую величину, вычисленную в магнитных единицах, называемую магнетон, которая повторяется во всех телах, обладающих свойством намагничивания, и по универсальности похожа на электрон в электричестве.

Мы увидим, что все эти понятия в своеобразной комбинации встречаются и в учении об электрической проводимости (гл. XII § 6).

8. Земной магнетизм представляет собою большой отдел физики земного шара; элементы земного магнетизма изучаются специальными магнитными обсерваториями, распределенными по поверхности земли, и магнитными экспедициями.

Этими элементами являются: 1. *Напряжение* земного поля, которое часто разлагается на горизонтальную и вертикальную составляющие. 2. *Склонение*, или угол, между географическим меридианом данного места и его магнитным меридианом, т.е. вертикальной плоскостью, заключающей в себе силовые линии земного поля данного места; в этой плоскости устанавливается магнитная стрелка, помещенная на вертикальном острие; знание этого угла необходимо, когда хотят по направлению стрелки в буссоли определить направление географического меридиана, т.е. страны света. В Ленинграде склонение равно 1° . 3. *Наклонение*, или угол, между горизонтальной плоскостью и магнитной стрелкой, могущей вращаться в магнитном меридиане вокруг горизонтальной оси. Этот угол дает направление касательной к силовой линии в данной точке земного поля.

Чем ближе мы приближаемся к магнитному полюсу земли, тем больше угол наклонения; в Ленинграде магнитная стрелка наклоняется своим северным концом вниз и образует с горизонтальной плоскостью угол в $70^\circ 43'$.

Измерения магнитных элементов показывают, что земля имеет много полюсов, но два главнейших из них находятся вблизи географических полюсов. Многие полюса, так называемые местные, настолько слабы, что действуют на стрелку лишь в очень ограниченном районе земной поверхности.

Элементы земного магнетизма в каждом данном месте на поверхности земли не остаются постоянными; и напряжение поля, и склонение, и наклонение изменяются периодически с периодом равным одним суткам и сверх того с периодом, продолжающимся целый год. Кроме того наблюдается еще вековое изменение элементов, налагающееся на оба предыдущие.

Было бы чрезвычайно трудно понять эти периодические изменения магнитных элементов, происходящие для каждой точки на поверхности земли в свои особые часы, если бы мы смотрели на магнитные силы, как взаимодействия полюсов — земных и магнитной стрелки. Теория магнитного потока позволяет предполагать, что вариации земного магнетизма происходят от суточных и годовых

изменений в температуре, влажности и т. д. воздуха; эти изменения сопутствуют в каждом данном месте изменениям в свете от Солнца и выражаются в магнетизме, как местные изменения проницаемости атмосферы; изменение же проницаемости влечет за собой сгущение или разрежение земного потока в данном месте и изменение его направления и напряжения. Такое объяснение магнитных вариаций предлагал Фарадей. Но в настоящее время оно признано недостаточным; ближе к количественной стороне явления оказывается теория, предполагающая, что под действием солнечных лучей в верхних слоях атмосферы образуются воздушные течения; так как воздух в этих слоях наэлектризован (положительно), то его потоки (ветры) действуют, как электрические токи, образуют магнитное поле, которое и накладывается на земное поле, изменяя этим его элементы (глава XIII, § 8).

Современные геофизики и основное магнитное поле земли склонны считать за электромагнитное, т. е. происходящее от токов по поверхности или в глубине земли. Если считать землю магнитом, то нужно предположить в ее полюсах невероятно громадное количество магнетизма, а именно 10^{11} CGS единиц.

Иногда магниты точных приборов на магнитных обсерваториях приходят в беспокойное состояние, которое продолжается нередко лишь весьма короткое время. Такое явление называется магнитной бурей. Эти вариации больше суточных; они достигают нескольких градусов в угле склонения, тогда как суточные не превосходят 2 — 3 минут. Магнитные бури налетают неожиданно и бывают особенно часты в те годы, когда поверхность Солнца изобилует пятнами; эти годы наступают через 11 лет. Существует весьма вероятное предположение, что солнечные пятна образуют мощные магнитные потоки, идущие с поверхности Солнца и обнаруживающие свое действие на Земле в виде магнитных бурь.

В некоторых магнитных *вариациях*, как и в полярных сияниях, и грозах, и изменениях атмосферного давления подмечен период приблизительно в 26 суток — время обращения Солнца вокруг оси.

9. Из истории науки о магнетизме. Для усвоения современных представлений, относящихся к магнетизму, очень полезно познакомиться с тем, как они произошли. Учение о потоке, о напряжении поля может быть понято, с одной стороны, слишком реалистически, с другой — может быть рассматриваемо, как какая-то выдумка, случайно, по почину одного ума, вошедшая в общее употребление.

Магнитный поток с определенным напряжением в каждой своей точке не есть явление, открытое каким-либо исследователем, но, конечно, не представляет собой и простой игры словами. Он должен быть рассматриваем, как современное выражение символа, которым с древности старались открыть загадку магнитных действий и под которым каждый может понимать то, что для него наиболее ясно. Как увидим ниже, все это почти в такой же мере относится и к электрическим действиям.

Магнитный поток выказывает свои свойства в притяжении магнитом железа (проницаемость потоку) и в определенной ориентировке магнита на земле (напряжение и направление магнитного потока). Оба эти явления были открыты в эпоху около 1000 лет до нашей эры: первое — в Греции, второе — в Китае. Первые же сведения об открытии китайцев показывают уже, что они пользовались им практически, как способом узнать направление при путешествии, но сначала только на суше. Считают вероятным, что и в Европе, независимо от китайцев было открыто свойство магнита указывать направление, и, может-быть, даже раньше, чем свойство — притягивать железо. Возможно, что при великом переселении народов люди руководились на своем пути магнитными камнями; тогда как притяжение железа могло быть открыто только по наступлении железного века, когда человеку удалось одержать эту важную и трудную победу — выделение железа из руды.

Мысль древних людей была поражена свойствами магнита; и эти свойства были поняты, как непосредственное действие божества, направляющего магнитный камень, дающего ему силу брать столь трудно добываемое железо. Особенно много мифологических сказаний вращалось вокруг так называемой самофракийской цепи; это явление заключается в том, что если позволить магниту притянуть к себе железное кольцо, то это последнее может притянуть к себе второе железное кольцо и т. д.; получается цепь, висящая на магните, кольца которой, однако, не сцеплены друг с другом, как в обыкновенной цепи; она рассыпается на свои звенья, как только отнять верхнее кольцо от магнита. Здесь божественная сила магнита передается от железа к железу, подобно, тому, — говорил Сократ, — как вдохновение музы передается через поэта его рассказчику, слушателю и т. д.

При таком представлении грань между возможным и невозможным не существовала. Греки вообще смотрели на природу „с закрытыми глазами“. Рассказывали, например, про различные „священные предметы“, что они висели в воздухе под действием магнита; т.-е.

не падали вниз, не поднимались к полюсу; что иногда железо отталкивается от магнита. Сказки про магнитные явления жили еще и в средние века (приближение магнита делает рану безболезненной, чеснок размагничивает магнит, алмазы притягивают железо), живут и в наше время.

Первую попытку понять свойства магнита, как действия его собственной сущности, мы видим у Фалеса (VI в. до нашей эры); он учил, что магнит имеет душу, производящую его силы. Первую попытку свести эту сущность на физические процессы сделал Лукреций (I в. до нашей эры): он представлял себе, что из магнита истекает нечто, расталкивающее воздух; железо, заслоня это действие, гонится в образовавшуюся пустоту заслоненным воздухом и поэтому приближается к магниту; эти же струи связывают, по Лукрецию, и кольца самофракийской цепи. Так началась наука о магнетизме.

Через много столетий, за которые было открыто много истинных фактов магнетизма, между прочим — необходимое существование *двух* полюсов и определение их мест, ¹⁾ Никколо Кабео (XII в. нашей эры) продолжает теорию Лукреция: две кучи железных опилок, торчащих „как волосы“, у обоих концов магнита, доказывают для Кабео два истечения, выходящих из магнитных полюсов; направления, по которым располагаются опилки, и суть направления истечений.

Эта теория близкодействия приобрела более ясную форму в изложении Декарта (середина XVII в.): он полагал, что нити вихрей пробиваются *по магниту* от одного конца к другому; выходят из одного его полюса и, встречая большое сопротивление в воздухе, поворачивают к другому полюсу, через который и возвращаются в магнит. Железо обладает порами, облегчающими движение вихрей; вихревой поток входит в него, выталкивая воздух из пространства между полюсом и железом; окружающий воздух двигает железо к магниту, как у Лукреция. Один конец магнита более удобен для входа вихрей; если подвижный магнит поставлен своим концом, удобным для входа, под углом к направлению движения вихрей, вихревой поток, производимый землею, устанавливает этот магнит по своему направлению.

¹⁾ Петр Пилигрим (XII в.) убедился, что, разрезав магнит на две части, получаем два магнита с двумя полюсами на каждом; разрезав эти половины опять пополам, получаем четыре магнита с двумя полюсами каждый.

Идея близкодействия, высказанная Лукрецием, воплотилась у Кабео в представление о двух потоках; исходящих из двух полюсов; потоках, дающих уже и направление действиям магнита. Декарт соединил два потока в один, связав таким образом оба полюса в одно целое, как место входа и выхода одного и того же потока. Великое значение этой теории обозначилось уже триста лет тому назад; она слила оба основных магнитных явления в одно явление замкнутого на себя потока.

В те же века, те же самые факты давали мыслям других исследователей магнетизма другое направление. Здесь главное значение придавалось не действию магнита на железо, но ориентировке его в пространстве и действию полюсов двух магнитов друг на друга.

Сущность магнита, его „душа“, превратившаяся, как мы только что видели, в его поток, в явление близкодействия, была заменена, с другой стороны, представлением о магните, как части вселенной, находящейся под действием остальных ее частей; Петр Пилигрим рассматривал магнитный камень, отточенный в виде шара; железные опилки вычерчивали на нем магнитные меридианы, взаимно пересекающиеся в двух диаметрально противоположных точках — полюсах магнита (см. выше стр. 71). Получалось таким образом геометрическое подобие небесной сферы, усугублявшееся тем, что по тогдашнему представлению магнит устанавливается своими полюсами к полюсам мира. Это подобие привело П. Пилигрима к учению, что магнит устанавливается в пространстве под действием всей небесной сферы; отсюда уже он предположил, что если точно шарообразный магнит тщательно установить на оси вращения параллельной оси мира, то он придет во вращение, увлекаемый небесной сферой (тогда предполагали, что Земля неподвижна, а вращается небесный свод); это был первый проект *perpetuum mobile*.

После того, как было наблюдено восточное склонение в Европе, а в конце XV в. Колумб во время своего путешествия в Америку открыл существование западного склонения, Гильберт (1660 г.) доказал, что полюса магнита обращаются не к полюсам мира, но к двум точкам на земле — ее магнитным полюсам.

С этого времени земля была определенно представляема магнитом. Будучи последователем Коперника, Гильберт старался слить в общее представление магнитность Земли и ее вращение

вокруг оси; *perpetuum mobile* Пилигрима получило новое превращение.¹⁾

Гильберт представлял себе магнит окруженным сферою действия; тут уже не было места для бесконечно разнообразных форм, какие может принимать магнитный поток в зависимости от проницаемости различных частей среды; и, наоборот, в этой единой, идеальной форме сферического действия была подготовлена почва для закона взаимодействия полюсов обратно пропорционально квадрату расстояния, так как действие, заключенное в сфере, убывает с расстоянием именно по этому закону. Он и был высказан впервые Митчелем (1750 г.) в его трактате об искусственных магнитах.

Магнитные сферы, вращающиеся вокруг оси, соприкасающиеся, задевающие одна другую, были для Гильберта типом небесных тел, основанием для разгадки мировой механики.²⁾ Здесь было много Аристотелевского с его учением о совершенстве шара, о совершен-

¹⁾ Современная наука не отрицает возможности связи между вращением тела, напр., Земли, и его магнитностью; но по теперешним представлениям, не предполагают вращения, как результат намагниченности, а, наоборот, магнитное состояние, как результат вращения. Прямые доводы к этому имеются среди наблюдений поверхности Солнца. Одни из искуснейших экспериментаторов XIX в., покойный П. Н. Лебедев, приводил во вращение цилиндры из латуни, эбонита и воды с такою скоростью (30 000 оборотов в мин., линейная скорость до 95 м в сек.), что если Земля обладает с ним магнитным полем вследствие вращения, то его цилиндры должны были дать магнитн. поле, достаточное для измерения стрелкой, столь чувствительно подвешенной, как это было в опытах Лебедева. Опыты дали отрицательный результат.

Лебедев делал свои расчеты в предположении, что при вращении тела его электроны (см. главу XIII, § 10) оттесняются центробежной силой кнаружи, отделяются таким образом от (+) электричества в теле и своим вращением образуют конвекционный ток, производящий магнитное поле.

По мнению Лебедева, отрицательный результат, полученный им, все же не заставляет отказаться от мысли, что Земля магнитна вследствие своего вращения. Явление может иметь место, но только происходит оно по другому способу, чем действие центробежной силы на электроны, дающему большой результат для огромной массы Земли и ничтожный — для тех небольших тел, которые были исследуемы в опыте Лебедева. В последнее время „магнетизм вращения“ получен на опыте в довольно убедительной форме.

²⁾ Парк Бенжамен видит в этом представлении предвестие электродвигателя, в котором магнитное поле электромагнитов захватывает магнитное поле витков якоря.

стве кругового движения, единственно приличных для природы. На ряду с удивительно правильно поставленными опытами было много еще убеждения в том, что „должно быть“, вместо единственного искания того, что существует на самом деле.

Отвлеченность этого представления о магнитном действии на расстояние давала повод к фантастическим предположениям: в XVI и XVII вв. много раз возрождалась идея о магнитном способе сообщения между людьми на каком угодно расстоянии, через какие угодно вещественные преграды; это предположение высказал, например, I. Б. Порты (1558 г.): по его мнению, в двух совершенно одинаковых буссолях, помещенных на каком угодно расстоянии, за каждым перемещением стрелки одной буссоли будет следовать такое же перемещение на другой; два человека, одновременно наблюдающие за такими буссолями, лимбы которых снабжены алфавитом, могут вести переговоры на расстоянии. Некоторые видят в этой безбрежной фантазии предвестие электромагнитного телеграфа.

Однако, именно этот взгляд на магнитные действия и был положен в основу науки о магнетизме XIX века. Взаимодействие полюсов, как чистое действие на расстоянии, было выдвинуто на главное место, как это и выражено в § 1 настоящей главы. Всякое магнитное явление, казалось, могло быть понято помощью математической обработки одного только закона Кулона, в его идеальной форме. Так возникла (стр. 70) рациональная наука физико-математиков прошлого века.

Фарадей повернул русло научного исследования вновь к представлению о магнитном потоке. Это произошло не сразу. Его современники относились презрительно к идее близкодействия, ведущей, по их мнению, ко всевозможным фантастическим допущениям; примеры таких мнимо-реальных воззрений мы действительно и видели в подробностях учения Кабео и Декарта.

Лишь после долгой работы самого Фарадея и его ближайших последователей вся наука двинулась по этому „новому“ направлению, когда стала ясно, что можно в изображении близкодействия остановиться на такой достаточно общей картине, которая ни в чем не выходит за пределы точно измеренного на опыте. Этот-то осторожно обрисованный образ мы и назвали выше научным символом магнитного потока; изложению его и посвящены §§ 5 — 7.

ГЛАВА V.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИЛА.

1. Основные явления. Пока мы рассматриваем ток по металлическому проводнику и обращаем внимание только на то, что происходит внутри этого проводника, мы знакомимся только с одним действием тока — нагреванием проводника.

Но давно уже открыто на опыте, что электрический ток оказывает действие и вне проводника; это действие не такого рода, чтобы мы его могли заметить нашими чувствами; электрический ток действует с известною силою¹⁾ на магнит, расположенный вблизи его:

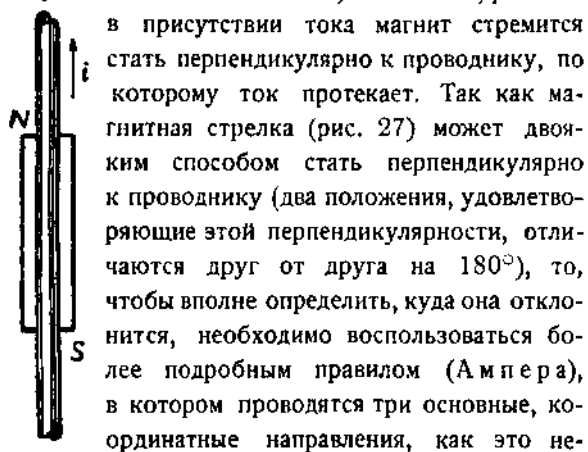


Рис. 27. обходимо всегда при определении на-

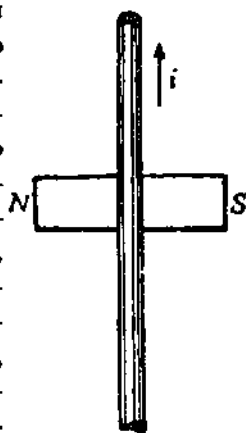


Рис. 28.

правления в пространстве: если вообразить себя стоящим вдоль тока, при чем направление тока должно совпадать с направлением от ног к голове (этим определяется одна ось координат в пространстве), и смотрящим на северный полюс стрелки (вторая ось), то этот полюс окажется отклоняющимся (рис. 28) влево (третья ось).

¹⁾ Эта действительная „сила“ тока и заставляет отказаться от термина: сила при определении величины тока i .

Южный полюс при этом отклонится направо. Это амперовское правило легко применить ко всякому случаю относительного положения тока и магнита.

Действие тока на магнитную стрелку, открытое Эрстедтом в 1819 г., очень поразило в свое время ученый мир; действительно, проволока, например, медная, сама по себе не действующая на магнит, как бы близко к нему она не находилась, тотчас же оказывает на него действие, как только по ней пущен ток; и притом она ни отталкивает, ни притягивает к себе полюсов магнита, а ставит ось его перпендикулярно себе; с таким случаем взаимодействия „под прямым углом“ (к линии, соединяющей действующий элемент проводника и нейтральную точку магнита) наука еще не была знакома.

И ньютоновское всемирное притяжение масс, и силы взаимодействия между наэлектризованными телами, и взаимное притяжение и отталкивание магнитных полюсов — все это силы, направленные вдоль линии, соединяющей тела, которые действуют друг на друга.

Открытие Эрстеда было первым примером силы электромагнитной; как увидим ниже, открытое им явление — основное для понимания электромагнетизма.

Второе явление было открыто Ампером; оно состоит в том, что два проводника, несущие токи, взаимодействуют; если они параллельны, и их токи одинаково направлены, то проводники эти взаимно притягиваются; в случае противоположно направленных токов они взаимно отталкиваются. Если проводники не параллельны, но и не взаимно перпендикулярны, они кроме того стремятся повернуться так, чтобы стать параллельными и с одинаково направленными токами.

Далее следует открытие свойств соленоида, сделанное тоже Ампером, который так углубился в электромагнетизм, что, оставив свои прежние чисто математические исследования, обратился всецело к физическим вопросам. Явление это состоит в том, что прибор, сделанный из проводника, свернутого спирально (намотанного, напр., на деревянный цилиндр), становится совершенно подобным магниту, если по нему пустить ток; соленоид с током обнаруживает на своих концах северный и южный полюса; поэтому он становится вдоль магнитного меридиана, притягивает к себе железо, притягивает к своим конечным сечениям или отталкивает от них соответственные полюса магнитов и, наконец, взаимодействует с другим соленоидом, тоже несущим ток по себе, как магнит взаимодействует с магнитом.

Но соленоид представляет собою всегда слабый магнит. Если же внутри его поместить железный стержень, так называемый сердечник, то получим *электромагнит*, могущий обнаруживать действие магнита в весьма сильной степени, превосходящей действие всякого стального, постоянного магнита. Электромагнит, конечно, нельзя назвать постоянным магнитом, так как стоит лишь разомкнуть ток по его соленоиду (обмотке), тотчас же его магнитное действие исчезает, и остается лишь остаточный магнетизм сердечника. Обмотка его обратится в кусок простой медной проволоки, свернутой спирально. Открытие электромагнита принадлежит Стерджону и Араго.

Остается упомянуть еще об одном явлении, в котором действует электромагнитная сила — об электромагнитном движении; всякий проводник с током, пока он только еще отклоняет магнит, есть электродвигатель (или электромотор); два проводника, когда они сближаются, соленоид, когда он притягивает к себе полюс магнита, все это электромоторы.

При этом необходимо отметить, что электромагнитное действие представляет собою всегда взаимодействие двух тел; двигаться (по обычным законам динамики) будет то из них, которое может совершить движение в направлении электромагнитной силы; если оба тела закреплены, движения не произойдет; если оба свободны, оба будут участвовать в движении. Так, например, в основном опыте Эрстедта не только стрелка стремится стать перпендикулярно к проводнику (рис. 28), повертываясь против часовой стрелки, но и проводник — перпендикулярно к магнитной оси стрелки; при этом он стремится поворачиваться в обратную сторону; это следует уже и из того основоположения механики (3-ий закон Ньютона), которое учит, что всякому действию сопутствует равное ему противодействие, и которое в данном случае лишь несколько осложнено и необычно, потому что взаимодействие здесь совершается „под прямым углом“.

Технические электродвигатели и представляют собою приборы, в которых движущуюся частью является проводник с током, а магнит, действующий на него, остается неподвижным.

Мы назвали электродвигателем проводник, поворачивающий стрелку или сам поворачивающийся под ее действием; но движение, производимое в таком приборе, слишком кратковременно; остроумие изобретателей и было направлено к придумыванию такого устройства, при котором на место отодвинувшейся части становилась бы

другая, готовая тоже двигаться под действием той же электромагнитной силы; в таком приборе движение могло бы продолжаться при постоянно протекающем токе неопределенно долгое время.

В тех случаях, когда оба тела, находящиеся под электромагнитным взаимодействием, закреплены неподвижно, можно все-таки наблюдать некоторое перемещение, но уже не самого проводника, находящегося, например, под действием магнита, а *тока в проводнике*; этот ток, повинувшись электромагнитной силе, пойдет не вдоль проволоки, но будет в ней известным образом изгибаться. Явления этого рода довольно многообразны; они наблюдаются косвенным путем, более трудны для понимания. Иметь понятие о них полезно в том отношении, что этим оттеняется характер разбираемых нами случаев электромагнитного действия, в которых это действие обнаруживается на перемещении самих осязаемых тел, а не токов внутри тел (см. главу XIII § 7 и 12).

Теория электромагнитной силы заключается в том, что все случаи проявления этой силы объединяются одним общим представлением; эта теория позволяет предвидеть все разнообразие электромагнитных явлений, открытых, как мы упоминали, каждое отдельно, как нечто новое; наконец, она позволяет предвычислить величину электромагнитной силы для различных случаев.

Но эта теория будет недостаточна для понимания электродвигателя; здесь электрический ток не просто удерживает какой-нибудь предмет в известном положении, например, магнит, в положении перпендикулярном к току; *на такое статическое давление не затрачивается работа*; в случае двигателя электрический ток движет предмет против сил трения и т. п., т.-е. совершает механическую работу; энергия тока идет, следовательно, не только на нагревание цепи, но и на механическую работу, и данное выше понятие о токе уже недостаточно для этих случаев (ср. главу IX § 9).

2. Поле вокруг тока. Ставши на современную точку зрения, мы понимаем явление, открытое Эрстедтом, не как прямое действие тока на стрелку; стрелка повинувается действию магнитного поля, которое создается током вокруг проводника; ток действует на стрелку не прямо, но через посредство магнитного потока, который он создает вокруг себя. Этот поток можно исследовать маленькими магнитными стрелками или железными опилками, которые, как всегда, устанавливаются вдоль потока, по касательным к его силовым линиям. Подобными опытами доказывается, что вокруг прямолинейного проводника, вокруг каждого его элемента образуется коль-

цевое магнитное поле с силовыми линиями в виде кругов, центры которых лежат на осевой линии проводника (рис. 29). Здесь особенно очевидна замкнутая форма магнитного потока, которую мы предполагали и в поле от магнита. Этот-то кольцевой поток и поворачивает магнитную стрелку перпендикулярно к току. Мы приписываем этому потоку направление в ту сторону, в которую он устремляет северный полюс (как на рис. 23) стрелки; в эту сторону и задвигался бы северный полюс по силовой линии, если бы он отделился от южного. Согласно амперовскому правилу, это направление нанесено на рис. 29. Получившийся чертеж легко запомнить, пользуясь „правилом винта“, которое дал Максвелл: вокруг тока образуется магнитный поток такого направления, в каком следует вращать винт, чтобы его поступательное движение совпало с направлением тока (под „винтом“ разумеется обычная у нас правая нарезка винта). На рис. 29 изображены разные случаи положения проводников с означенными направлениями тока; во всех случаях легко указать направление магнитных силовых линий.

3. Закон Лапласа. Основную идею в теории электромагнетизма и служит представление о том, что ток всегда сопровождается магнитным полем, окружающим его со всех сторон; для вычисления электромагнитных сил необходимо лишь знать, как велико это магнитное поле в каждой данной точке; можно предвидеть, что оно увеличивается с величиною тока и уменьшается с удалением от проводника.

Опыт показывает, что магнитные силы тока прямо пропорциональны величине i . Относительно же того, как изменяется это действие с расстоянием — опыт ничего не может дать: мы не можем измерить магнитное поле при одном расстоянии тока от магнитного полюса, затем при другом и т. д., так как в каждом данном опыте магнитное поле в какой-либо точке является результатом суммы действия бесконечного множества элементов проводника, находящихся на бесконечно разнообразных расстояниях от полюса. Так,

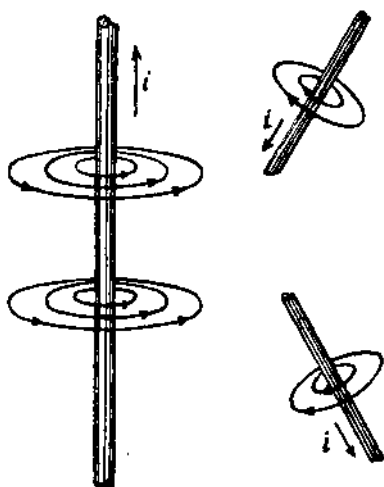


Рис. 29.

например, уже и в случае прямолинейного тока (рис. 30) полюс N отклоняется за плоскость чертежа под действием кольцевого поля, производимого различными элементами Δl .

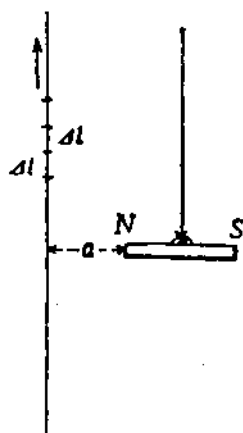


Рис. 30.

Если мы, согнув проводник, придаем ему другую форму, расстояние его элементов до N изменяется, и магнитное поле в той же самой точке пространства станет иным. Опыт позволяет измерить и это новое поле, но предсказать его, зная поле прямолинейного провода, невозможно.

Мы бы могли вычислить поле для какого угодно практического примера, если бы знали, по какому закону действие каждого элемента проводника изменяется с расстоянием от полюса; этого не может дать опыт, так как ток течет всегда по замкнутой цепи, т.-е. по конечному проводу, состоящему из бесконечного числа элементов.

В таких случаях теория исходит из сверх-опытного, априорного, принципиального положения, которое и кладется в ее основу, если опыт оправдывает следствия, вытекающие из этого положения.

Наиболее просто изложить эту теорию исторически, т.-е. так, как она произошла, сначала — с точки зрения дальнего действия и количеств магнетизма, а затем уже перейти на язык современного учения о потоке.

Лаплас дал закон действия элемента проводника Δl (рис. 31) с током i на полюс с количеством магнетизма m (в воздухе):

$$\Delta F = \frac{i \cdot m \cdot \Delta l}{r^2} \cdot \sin \theta; \quad (16)$$

здесь ΔF означает бесконечно малую силу этого элементарного действия, r — расстояние между m и Δl , ¹⁾ θ — угол между Δl и r . Мы видим, что ΔF зависит от угла наклона тока к линии, соединяющей его с m . Формула (16) дает величину силы ΔF ; направление же ее перпендикулярно к плоскости, заключающей в себе Δl и r (плоскости рис. 31), в сторону от читателя за чертеж (правило Ампера).

¹⁾ Вследствие бесконечной малости Δl расстояние r можно считать до любой точки отрезка Δl .

Если по этой формуле выразить действие каждого элемента бесконечно длинного прямолинейного провода (рис. 30) и просуммировать, то мы получим:

$$F = \frac{2im}{a}, \quad (17)$$

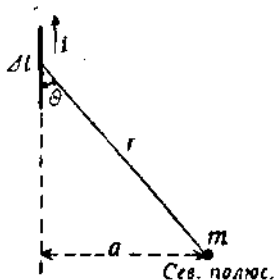


Рис. 31.



Рис. 32.

где a означает длину перпендикуляра из m на направление тока. Это выражение именно и было найдено на опытах Био и Савара, измерявших, как изменяется сила, с которою длинный прямолинейный ток действует на полюс магнита, если будем изменять a .

Согласно определению напряжения поля, как силы, с которою поле действует на ед. магнетизма, мы получаем для напряжения поля от прямолинейного провода на расстоянии a от него величину:

$$\frac{F}{m} = H = \frac{2i}{a}. \quad (18)$$

Применение формулы (16) к прямолинейному проводу дает результат согласный с опытами; это и является первым подтверждением верности формулы (16).

4. Круговой проводник. Лапласовскую формулу (16) легко применить к круговому проводнику, в центре которого находится полюс m . В этом случае направление тока для всех элементов ΔI перпендикулярно к соответствующему r , так как ток течет по окружности, а радиус перпендикулярен к элементу окружности, через который он проходит; следовательно, для всех элементов $\sin \theta = 1$. Все элементарные силы ΔF направлены по перпендикуляру к плоскости круга (рис. 32) и проходят через его центр, а, следовательно, их равнодействующая равна алгебраической сумме их:

$$F = \sum \Delta F = \sum \frac{\Delta l \cdot i \cdot m}{r^2}.$$

Вынеся за знак суммы общий множитель всех ее слагаемых, получаем

$$F = \frac{im}{r^2} \sum \Delta l = \frac{2\pi im}{r},$$

так как $\sum \Delta l = 2\pi r$.

Во всей своей простоте условия, к которым относится эта формула, не могут быть выполнены на практике: не может быть проделан опыт с одним только полюсом, а оба полюса магнита не могут находиться в центре проводника. Но ошибка от несовпадения полюсов с центром будет тем меньше, чем короче магнит в сравнении с радиусом кругового проводника. Для увеличения силы F берут обыкновенно проводник в несколько (n) оборотов; полагая, что ко всем им относится одна и та же формула с некоторым средним r , для силы электромагнитного действия получаем:

$$F = \frac{2\pi n i m}{r}. \quad (19)$$

Напряжение поля в центре такой катушки с n оборотами

$$\frac{F}{m} = H = \frac{2\pi n i}{r}.$$

5. Тангенс-гальванометр. На законе действия кругового тока на стрелку, находящуюся в „его центре“, основывается теория тангенс-гальванометра: это — один из старейших электрических приборов, сохранивший, однако, известное значение и до настоящего времени.

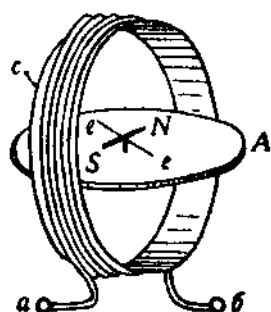


Рис. 33.

Тангенс - гальванометр служит для измерения величины тока; в главнейших своих частях он состоит из вертикального круглого обода c (медного или деревянного), на котором имеется несколько витков медной изолированной проволоки, включаемой чрез зажимы a и b (рис. 33) в цепь измеряемого тока; в центре этой обмотки на острие вертикальной иглы опирается короткая магнитная стрелка NS , могущая, следовательно, вращаться в горизонтальной плоскости; под стрелкой укреплен горизон-

тальный лимб A с круговыми делениями, по которому отсчитываются углы отклонений стрелки; так как стрелка коротка, то углы ее

отклонений наблюдаются по отклонениям более длинного указателя ee , прикрепленного к стрелке неподвижно, и потому отклоняющегося вместе с ней. Указатель делается из немагнитного материала и на действие прибора не оказывает прямого влияния.

Прибор действует следующим образом: до пропускания тока через его обмотку (c) стрелка устанавливается *сама* в плоскости магнитного меридиана. Круг c поворачивают таким образом (он должен вращаться вокруг вертикальной оси), чтобы плоскости его витков были параллельны стрелке, т.е. совпадали с магнитным меридианом. Затем при пропускании тока стрелка под действием электромагнитной силы F [форм. (19)] стремится повернуться на прямой угол и стать перпендикулярно к плоскости витков. Силы же земного магнетизма все время стремятся возратить ее в положение параллельное магнитному меридиану. Под действием этих двух сил стрелка устанавливается по их равнодействующей.

Из этого соображения и выводится формула, позволяющая по углу, под которым установилась отклоненная стрелка, определить величину тока.

На рис. 34-а изображен виток (M) обмотки, находящейся в плоскости магнитного меридиана; в этой плоскости находился магнит до своего отклонения; на рис. он изображен отклоненным в положении NS . Пусть M на рис. 34-б (явление изображено в пло-

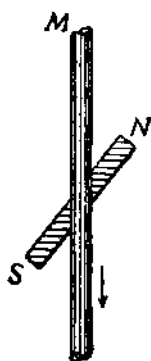


Рис. 34-а.

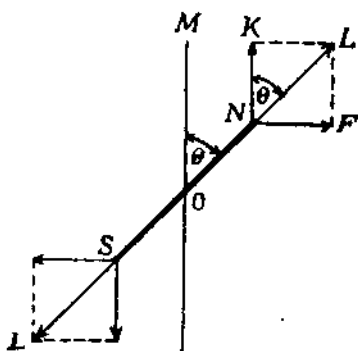


Рис. 34-б.

кости лимба) означает направление стрелки до пропускания тока, совпадающее с направлением плоскости оборотов и магнитного меридиана, а NS есть направление отклоненной стрелки; когда отклонение завершилось, эта последняя должна быть направлена по равнодействующей NL сил электромагнитной F и земного магнетизма K ;

KN параллельна OM ; поэтому угол $KNL =$ углу отклонения стрелки Θ . Сила F перпендикулярна к силе K , так как она перпендикулярна к плоскости витков, а, следовательно, и к магнитному меридиану, если витки верно были установлены до прохождения тока. Поэтому „параллелограмм сил“ обращается у нас в прямоугольник, и мы имеем (из $\triangle LNK$):

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{F}{K}.$$

То же самое мы получим из построения сил, действующих в обратную сторону на второй полюс стрелки.

Заменим F выражением ее из формулы (19); вспомним, что K равняется горизонтальной составляющей¹⁾ напряжения земного поля, H_z , помноженной на количество магнетизма (m) в каждом полюсе стрелки прибора; тогда имеем:

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{2 \pi n i m}{r H_z m} = \frac{2 \pi n i}{r H_z};$$

откуда получаем

$$i = \frac{H_z r}{2 \pi n} \operatorname{tg} \Theta = k \operatorname{tg} \Theta.$$

Это соотношение позволяет вычислить i по наблюдаемому Θ , если известны все величины, входящие в k ; k называется *постоянной*, или *переводным множителем* тангенс-гальванометра. Мы видим, что k зависит от места и времени наблюдения, так как в него входит H_z , и не зависит от степени намагничивания стрелки. Если все величины, входящие в k , точно известны, то i определяется „абсолютным измерением“.

Если k неизвестно, то тангенс-гальванометр позволяет лишь сравнивать токи: так, если два тока i и i' дали отклонения Θ и Θ' , то отношение токов (относительное измерение)

$$\frac{i}{i'} = \frac{k \operatorname{tg} \Theta}{k \operatorname{tg} \Theta'} = \frac{\operatorname{tg} \Theta}{\operatorname{tg} \Theta'}.$$

равно отношению tg -ов углов отклонения.

6. Ошибки тангенс-гальванометра. Если острие, на которое опирается стрелка, не находится в центре лимба, то углы отклонения ее не могут быть измеряемы дугами, описываемыми стрелкою (или ее указателем) на окружности лимба; это будут не централь-

¹⁾ Так как стрелка вращается в горизонтальной плоскости.

ные углы, но углы „с центром внутри окружности“; подобный угол измеряется полусуммой дуг; чтобы узнать его, необходимо отсчитать обе дуги, описываемые стрелкою на лимбе, т.е. произвести два отсчета, по обоим концам стрелки (указателя) и взять их полусумму.

Описываемое отступление от теоретического прибора называется ошибкой *эксцентриситета*.

Вторую ошибкою является *непараллельность плоскости витков обмотки магнитному меридиану* (на параллельности их основывается, как мы видели, теория прибора). Влияние этой ошибки можно видеть из следующего: если в идеальном приборе (рис. 34-б), давшем идеально верное отклонение $\Theta = \alpha$, мы повернем плоскость оборотов (совпадающую с OM) на небольшой угол в ту же сторону, в которую отклонилась стрелка, мы этим увеличим ее отклонение α , так как сила F , а значит, и равнодействующая NL будут поворачиваться вместе с плоскостью оборотов; отклонение стрелки от меридиана OM , в котором она находилась до пропускания тока, окажется $\alpha + \epsilon$. Если плоскость оборотов повернуть в обратную сторону на такой же угол, то отклонение стрелки уменьшится и станет $\alpha - \epsilon$. Отсюда следует, что если ток отклоняет стрелку в ту же сторону, в которую вследствие ошибки прибора смещены витки, то получится угол $\alpha' = \alpha + \epsilon$; если перевернуть ток на обратный, то получается отсчет $\alpha'' = \alpha - \epsilon$; их полусумма дает истинное отклонение:

$$\alpha = \frac{\alpha' + \alpha''}{2}.$$

В виду возможности указанных двух ошибок, для измерения одного тока на тангенс-гальванометре приходится делать 4 отсчета, пропуская ток через прибор в двух взаимно противоположных направлениях и каждый раз отсчитывая по обоим концам стрелки.

7. CGS-ная единица величины тока; отношение между практическими и CGS-ными единицами. Как уже было упомянуто, в физике настоящего времени принято единицы для измерения всевозможных величин сводить все к одним и тем же трем основным единицам: *см, г, сек.*

Нужна очень определенная теория, чтобы такие величины, как величина тока, свести к сантиметру, грамму и секунде, не имеющим, казалось бы, с электрическим током ничего общего. Теория электромагнетизма дает нам средство сделать это; нужно лишь вспомнить определение единицы количества магнетизма в системе CGS (стр. 67),

Формула (19)

$$F = \frac{2\pi n i m}{r}$$

говорит нам, что единичный ток в системе *CGS* есть такой, который обтекая по кругу ($n=1$) радиуса 1 см ($r=1$), действует на 1 ед магнетизма, находящуюся в центре круга, с силою 2π дин. Такой ток должен быть в системе *CGS* принят за единицу, так как иначе закон природы, выражаемый уравнение (19), обращающийся при сказанных условиях в

$$2\pi = 2\pi i$$

не будет удовлетворен.¹⁾

Наша практическая единица тока: „ампер“ в 10 раз меньше *CGS*-ной.

$$1 \text{ ампер} = \frac{1}{10} \text{ CGS ед. тока.}$$

$$1 \text{ кулон} = \frac{1}{10} \text{ CGS ед. количества электричества.}$$

Вообще все практические единицы находятся в легкозапоминаемом отношении к *CGS*-ным. Продолжать систему *CGS* для электрических величин можно таким образом. Энергия тока $W = EQ$; в системе *CGS* она, как и всякая энергия, измеряется эргами. Следовательно, *CGS*-ною единицею разности потенциалов нужно считать такую, под которой 10 кулонов выделяют один эрг, так как для этого случая ($W=1$):

$$E \cdot 1 = 1, \text{ т.-е. } E = 1.$$

Эта разность потенциалов равняется 10^{-8} вольт, так как вольт всего лишь одному кулону (а не десяти) придает энергию в один джоуль равный 10^7 эргам.

$$1 \text{ вольт} = \frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}} = \frac{10^7}{10^{-1}} = 10^8 \text{ CGS ед. разн. потенциалов.}$$

Один вольт = 10^8 *CGS*-ных ед. разн. потенциалов.

Подобным же образом выводится из соответственных законов и определений, что

$$1 \text{ ом} = \frac{\text{вольт}}{\text{ампер}} = \frac{10^8}{10^{-1}} = 10^9 \text{ CGS ед. сопротивления.}$$

¹⁾ К тому же единичному току мы придем, основываясь на форм. (18) и вообще всякой, являющейся следствием закона Лапласа.

Необходимо запомнить перевод ампера и вольта в CGS -ную систему; при вычислении по формулам, связывающим магнитные и электрические величины, эти последние мы будем получать из формул или подставлять в них в CGS -ной системе, так как магнитные величины будут даны в CGS -ной системе, а, разумеется, все величины в одном и том же вычислении должны быть измерены однообразно; в противном случае можно прийти к какому угодно численному результату и лишь случайно и очень редко — к верному.

Например, спрашивается, какой ток в тангенс-гальванометре, имеющем 4 витка проволоки радиусом в 10 см, отклонит в Ленинграде ($H_z = 0,16$) стрелку на 45° ?

Подставляя в формулу тангенс-гальванометра известные величины имеет:

$$i = \frac{10 \cdot 0,16}{2\pi \cdot 4} \cdot 1 = 0,06.$$

Ответ получился в CGS системе, так как все величины, участвующие при решении, выражены в ней. Переходя к практической, получаем $i = 0,6$ А.

8. Соленоид. Соленоидом в теории называется цилиндрический проводник, полый внутри, по стенке которого поперек оси идет ток, занимающий своею, так сказать, шириною всю длину цилиндра. Практическое приближение к соленоиду представляется проводником спирально навитым по цилиндрической поверхности, витки которого, по возможности, близки друг к другу. Ток, проходя из одного витка в соседний, обтекает весь соленоид. Вокруг каждого элемента каждого из витков образуется при прохождении тока магнитный поток. Те части потоков соседних витков, которые находятся между витками (рис. 35), взаимно уничтожаются.¹⁾ Те же части, которые проходят внутри соленоида и вне его, складываются, как продолжающие друг друга, в общий поток. Этот магнитный поток соленоида выходит из одного его конца, обходит кругом него,

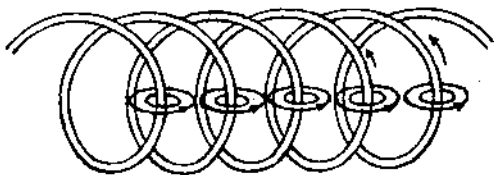


Рис. 35.

¹⁾ Тем совершеннее, чем ближе витки друг к другу.

входит через противоположный конец и, пройдя по внутренности соленоида, замыкается на себя (рис. 36).

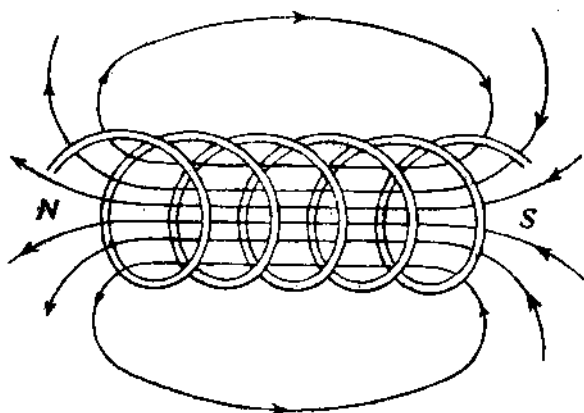


Рис. 36.

Магнитный поток соленоида тождествен по своему виду с потоком магнита; этим и объясняется одинаковость их действий.

При взгляде на соленоид, по виткам которого идет ток, а по оси — проходит магнитный поток, можно составить правило удобное для случая соленоида и представляющее собою перевернутое правило винта (стр. 93): „Если вращать винт по направлению тока в витках соленоида, то его поступательное движение будет направлено вдоль магнитного потока внутри соленоида“.

9. Электромагнит. Магнитодвижущая сила. Ток в соленоиде сопровождается магнитным потоком; но величина этого потока, „густота потока“ в одном и том же соленоиде может быть весьма различной. Здесь получается близкое сходство с тем, что гальванический элемент своею эдс E причиняет ток, величина которого может быть, однако, той или другой в зависимости от сопротивления R цепи; она определяется по формуле Ома из величин E и R .

Подобно этому, если мы потоку соленоида предоставим более легкий путь, через тела с большей проницаемостью, мы этим увеличим густоту потока, создаваемого соленоидом. В наибольшей степени это увеличение достигается мягким железом.

Самое большое сопротивление для потока соленоида, особенно если соленоид длинный и узкий, представляется его полостью.¹⁾

¹⁾ Вне соленоида поток расширяется по большему (собственно, бесконечному) сечению и потому встречает меньшее сопротивление.

Поэтому важнее всего заполнить железом эту цилиндрическую полость. Весьма часто электромагниты и имеют только железный *сердечник*.

Полезно обратить внимание на следующее обстоятельство: если мы единицу магнетизма, находящуюся на расстоянии a (рис. 37) от прямолинейного бесконечно - длинного проводника с током i , могли бы отпустить свободно двигаться, то она описала бы силовую линию, т.-е. круг с радиусом a ; при этом она все время находилась бы под действием силы $\frac{2i}{a}$ (форм. 18), так-что над нею была бы совершена работа

$$2\pi a \cdot \frac{2i}{a} = 4\pi i.$$

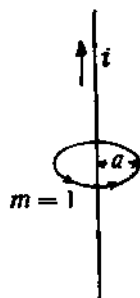


Рис. 37.

Если бы эта единица магнетизма приводила в движение какой-либо механизм, то она и передала бы ему свою работу. Эту „работу“, приходящуюся на каждую ед. „магнетизма“ в данном магнитном потоке, можно по аналогии со стр. 26 назвать его магнитною разностью потенциалов или *магнитодвижущую силу* потока. Она, действительно, характеризует весь данный поток, так как не зависит от случайно выбранного a , которое не входит в ее выражение. Но, оказывается, она не зависит и от формы проводника. Вокруг тока i , по какому бы проводнику он ни шел, создается магнитодвижущая сила $4\pi i$, а вокруг нескольких (n) проводников, например, в потоке соленоида, она равна $4\pi n i$. Не доказывая этого положения, мы им пользуемся в нижеследующем.

Полный магнитный поток Φ , создаваемый соленоидом, вычисляется по формуле, аналогичной формуле Ома:

$$\Phi = \frac{4\pi n i}{\text{магн. сопротивление}}; \quad (19')$$

здесь числитель представляет собою „магнитодвижущую силу“, а знаменатель вычисляется по длине, сечению и магнитной проницаемости тех тел, через которые поток проходит (стр. 75).

Φ есть весь магнитный поток, или полное число его линий; если сечение потока s и поток равномерен по всему своему сечению, то число линий на кв. см, то-есть густота потока индукции

$$B = \frac{\Phi}{S}.$$

Напряжение поля, создаваемое этим потоком,

$$H = \frac{B}{\mu}.$$

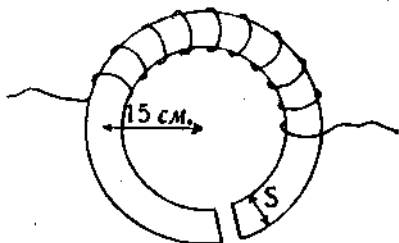


Рис. 37-а.

Все это легко объясняется на примере. Пусть мы имеем соленоид (рис. 37-а), согнутый в виде кольца (*тороид*), с сечением $s = 100$ кв. см и радиусом осевой линии $= 15$ см; он состоит из 100 витков, по нему идет ток в 10 А ($= 1$ CGS); проницаемость сердечника $= 500$.

Магнитодвиж. сила $= 4 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 1 = 1250$; магнитное сопротивление $= \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 15}{500 \cdot 100} = \frac{94,2}{50000}$; $\Phi = \frac{1250 \cdot 50000}{94,2} = 661 \cdot 10^3$;

откуда $B = \frac{\Phi}{100} = 6610$ максвеллов. Все в системе CGS.

Если в этом тороиде имеется воздушный промежуток, как это изображено на рис. 37-а, длиной, например, в 1 см, то магнитное сопротивление будет $\frac{1}{100} + \frac{94,2}{50000}$, ¹⁾ т.е. гораздо большее. В этом

случае $B = 1040$ максвеллов. Нередко в сравнении с сопротивлением воздушного промежутка можно даже пренебрегать сопротивлением железа сердечника.

10. Действие магнитного поля на проводник с током. Теорию этого действия мы начнем с самого важного на практике случая, изображенного на рис. 38; позади проводника с током i , направленным вверх, находится магнит, перпендикулярный к плоскости чертежа, направленный к нам, полюсом, сев. полюсом. По правилу Ампера этот полюс под действием тока стремится влево, по закону противодействия ток стремится сдвинуться направо.

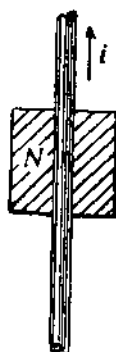


Рис. 38.

Вспомним, что здесь действуют магнитные поля, а не непосредственно полюс на ток. Одно поле — от магнита (постороннее току)

¹⁾ При приблизительном вычислении сопротивления воздушного промежутка предполагается, что поток пойдет по нему, не расширяясь; на самом деле вследствие расширения потока сопротивление воздуха будет несколько меньше (рис. 26-б).

направлено к нам, другое — вокруг тока — определяется по правилу винта. Эти два поля, складываясь, взаимно усиливаются с левой стороны проводника и взаимно вычитаются — с правой. Результат их сложения изображен приблизительно на рис. 39 в плане. Движение проводника, указанное стрелкою b , можно описать такими словами: проводник движется из мест более сильного поля (более сильного распора силовых трубок) в места более слабого.

И здесь, как и на стр. 76, можно применить принцип В, по которому магнитный поток обнаруживает на тела, погруженные в него, такие давления, чтобы получить путь меньшего сопротивления: сжатый и, следовательно, встречающий большое сопротивление поток в левой части пространства стремится расшириться на счет правой. Результатом этого стремления, этих сил распора, будет выталкивание проводника

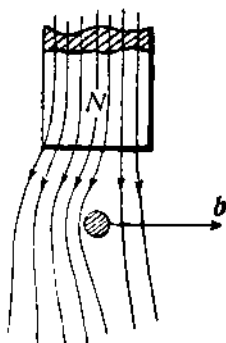


Рис. 39.

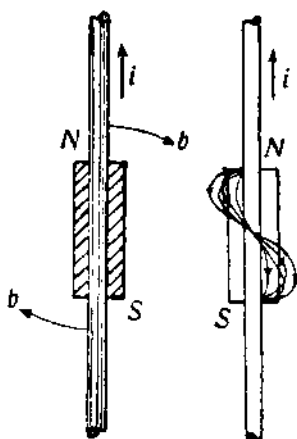


Рис. 40.

Рис. 40-а.

за границы потока, если механические условия не препятствуют этому движению.

Здесь особенно важно отметить, что проводник движется всегда поперек силовых линий магнита, так сказать, перерезывая их. Если повернуть проводник (рис. 38) на прямой угол так, чтобы ток шел направо, и повторить все рассуждение, то легко увидеть, что проводник будет двигаться в нижнюю часть чертежа, опять-таки пересекая силовые линии. То же самое мы получим и для всякого относительного расположения.

Если, например, проводник, по которому пущен ток, расположен вначале параллельно оси (рис. 40) магнита (который предположим закрепленным) и притом легко подвижен, то он *повернется* в положение перпендикулярное магниту, по направлению, указанному стрелками b (правило Ампера);¹⁾ кроме того, он будет *двигаться*

¹⁾ Это движение, обратное явлению Эрстеда, является тоже результатом сложения полей, только труднее изображаемого в этом примере, чем в предыдущем случае; попытка изобразить его дана на рис. 40-а.

к магниту, перерезая его силовые линии, пока не подойдет к его нейтральному сечению, т.-е. не войдет в A , вне области магнитного потока (рис. 41).

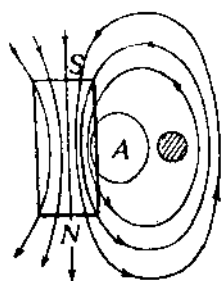


Рис. 41.

Если проводник не только легкоподвижен, но и легко сгибается, то все его элементы, стремясь приблизиться к магниту, обвивут его и проводник сообразится вокруг магнитного стержня спиральной линией, насколько это допускается механическими условиями.

Как для всех электромагнитных движений, так и для этого существуют обратные примеры, основанные на противодействии только-что объясненным силам: магнит, повернувшийся своей осью перпендикулярно к току, стремится приблизиться к нему своей нейтральной линией; гибкий магнитный стержень стремится обвить проводник с током, при чем его северный полюс будет описывать спиральную линию по правилу винта, а южный продолжать ее с другого конца, вращаясь вокруг тока в обратном направлении.

11. Закон действия поля на ток. Вывод этого закона не требует никаких новых положений; обратим внимание на тот элемент проводника (рис. 42), который находится как раз против полюса; линия, соединяющая его с полюсом, перпендикулярна к направлению элемента. Этот случай имеет главнейшее значение в практике.

По формуле (16) Лапласа, этот элемент действует на полюс с силой ($\theta = 90^\circ$)

$$\Delta F = \frac{im \Delta l}{r^2}.$$

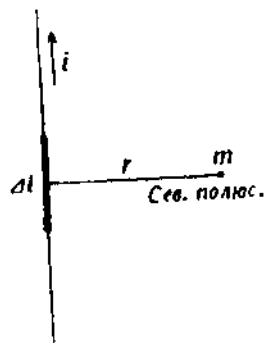


Рис. 42.

Таково же будет и противодействие (проводник устремляется по направлению к смотрящему на чертеж), т.-е. действие полюса на элемент тока. Чтобы оставаться верными воззрению на электромагнитное действие, как на действие магнитного потока, мы должны лишь соответственным образом прочесть приведенное выражение. В этой формуле уже имеется в скрытом виде напряжение поля. Действительно, напряжение поля, происходящее от полюса m в том месте, где находится Δl , равно силе, с которою этот полюс действовал бы на единицу магнетизма, помещенную на место Δl ; эта

сила, по закону Кулона, равна (полагаем проницаемость равной единице):

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

Введя H вместо $\frac{m}{r^2}$, получаем

$$\Delta F = H i \Delta l.$$

В этой формуле уже нет упоминания о полюсе, зато появилось напряжение поля для того места, где находится проводник.

На практике, в электромашинках, проводник, находящийся под действием магнитного потока, имеет конечные размеры; но все его элементы (несущие, конечно, один и тот же ток) находятся в поле одного и того же напряжения.

Электромагнитное действие на такой проводник равно, следовательно (в воздухе),

$$F = \sum H i \Delta l = H i \sum \Delta l,$$

или

$$F = H i l. \quad (20)$$

Таково выражение для силы, с которою действует поле с напряжением H на проводник длиной l , перпендикулярный к направлению поля и несущий ток i .

12. Взаимодействие токов. Как самый факт действия тока на ток, так и величина этого действия выводятся из предыдущего, и этим обнаруживается сила вышеприведенной теории.

Мы рассматриваем только параллельные проводники; пусть токи, текущие по ним, одного направления. Магнитный поток, создаваемый током i (рис. 43) вокруг проводника A , направлен в левой части чертежа к нам; вследствие этого проводник B находится в условиях, совершенно подобных тем, которые изображены на рис. 38; отсюда мы заключаем, что проводник B стремится двигаться направо, т.-е. по направлению к A .

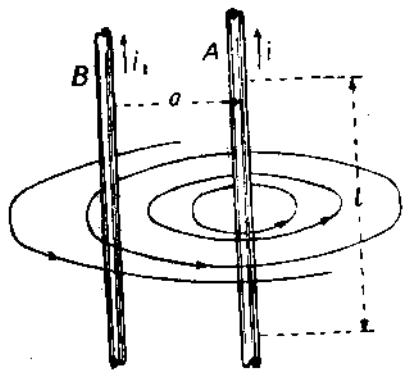


Рис. 43.

Если теперь обратим внимание на поток, создаваемый током B , то мы увидим, что A находится в таких условиях, что должен двигаться к B . Таким образом, взаимодействие магнитных потоков является истинною причиною взаимодействия токов, которые как бы взаимно притягиваются.

Если направление одного из потоков изменить на обратное, проводники окажутся стремящимися один от другого, и мы получаем объяснение взаимного отталкивания противоположно направленных параллельных токов.

Для объяснения взаимодействия токов можно было бы и не ссылаться на рис. 38; достаточно было бы вообразить себе сразу оба потока, производимые токами i и i_1 . Эти потоки в случае (рис. 43) будут одинаково направлены, т.-е. сложатся, в пространстве вне проводников и взаимно ослабятся — между ними. Образуется поток, приблизительно изображенный в плане на рис. 44. Этот поток, стремясь получить более короткий путь, сближает проводники.

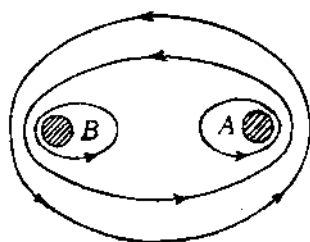


Рис. 44.

Напряжение поля, производимого прямолинейным током i , в тех точках, где находятся элементы проводника B , равно по формуле (18)

$$H = \frac{2i}{a},$$

где a означает расстояние между B и A . Следовательно, каждый отрезок l проводника B испытывает силу

$$F = H i_1 l = \frac{2i}{a} l i_1 = \frac{2l}{a} i i_1 \quad (21)$$

по формуле (20). Такую же силу (противодействия) испытывает каждый отрезок l проводника A .

Такова величина взаимодействия двух параллельных токов.

Это взаимодействие на практике обыкновенно выходит очень слабым; так, например, если $i = 20$ А; $i_1 = 50$ А; $a = 5$ мм и $l = 0,5$ м, то (все — в системе CGS):

$$F = \frac{2 \cdot 50}{0,5} \cdot 2 \cdot 5 = 2000 \text{ дин},$$

или приблизительно 2 грамма; т.-е. при столь больших токах и малом a , как данные в этом примере, проводник в полметра длиной может силою, приложенною к нему со стороны второго бесконечно-длинного тока, поднять гирьку всего лишь в 2 грамма.

13. Электромагнитные измерительные приборы. Существует большое число приборов различных типов, служащих для измерения величины тока и напряжения, под которым он течет, основанных на законах электромагнитной силы.

Приборы с магнитной стрелкой. Сюда относится описанный выше тангенс-гальванометр, а также многочисленные приборы, в которых обмотка, пропускающая ток, не имеет формы круга; эти приборы уже не подчиняются закону тангенсов; для увеличения чувствительности часто применяется так называемое астазирование стрелки, т.-е. уменьшение силы земного магнетизма (мешающей стрелке отклоняться), например, помощью соответственно расположенного магнита. Гальванометры с магнитною стрелкою не могут быть градуированы на амперы, так как в различных местах земного шара, а также в различные моменты, их стрелки под действием одного и того же тока отклоняются на различные углы вследствие изменения магнитных элементов. Эти приборы часто употребляются, как весьма чувствительные показатели присутствия или отсутствия тока, каковые необходимы, например, в мосте Витстона или при сравнении эдс потенциометром.

Приборы с подвижной катушкой. В этих приборах между полюсами сильного магнита (рис. 45) подвешивается на нити L катушка из изолированной проволоки; чрез концы ее a и b в нее вводится измеряемый ток; обе вертикальные стороны катушки стремятся тогда перерезывать магнитный поток (на черт. правая — в сторону к смотрящему на чертеж, левая — за плоскость чертежа); образуется пара сил, поворачивающая катушку, пока в закручивающейся при этом нити L не разовьется пара сил упругости, равная электромагнитной паре. Тогда катушка остановится.

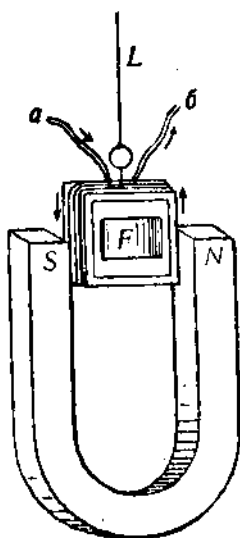


Рис. 45.

Пара сил упругости пропорциональна углу кручения нити a ; электромагнитная пара пропорциональна силе действия поля на ток; их равновесие выражается равенством, ¹⁾ где H — напряжение поля,

$$Hil = ka,$$

¹⁾ Предполагается, что поле перпендикулярно боковым сторонам катушки.

создаваемого магнитом, l — длина тех частей катушки, которые погружены в магнитный поток, k — зависит от коэффициента упругости нити L , числа витков в катушке и пр. Соединяя все постоянные прибора в одну, имеем

$$i = C \cdot \alpha,$$

т.-е. что в таком приборе ток пропорционален углу отклонения катушки.

Гальванометры с подвижной катушкой очень часто градуируются на амперы, так как действием земного поля на проволоки катушки можно пренебрегать в сравнении с гораздо более сильным действием постоянного магнита самого прибора.

Внутри катушки помещается цилиндрический кусок железа F , неподвижно закрепленный; он служит к тому, чтобы собрать магнитный поток к средней части катушки и усилить этим действие магнита.

По типу амперметров с подвижной катушкой строятся и вольтметры; их отличие заключается лишь в очень большом сопротивлении и в способе включения (см. стр. 57).

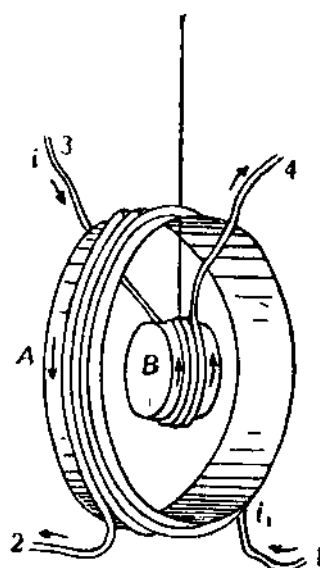


Рис. 46.

Электродинамометр состоит из двух катушек, одной неподвижной A (рис. 46) и другой B , могущей вращаться, например, вокруг вертикальной оси; эта катушка подвешивается на нити или закрепляется помощью часовой пружины, стремящейся вернуть ее в нормальное положение, при котором плоскости обеих катушек, например, взаимно перпендикулярны. Если по обеим катушкам пропустить токи соответственно i и i_1 , то боковые стороны катушки B будут испытывать стремление к соответствующим боковым сторонам катушки A , по которым идет ток того же направления (на рис. 46 передняя сторона B пойдет к правой — A). Катушка B , под действием этой пары сил, повернется на

такой угол, при котором пара электромагнитная, пропорциональная силе действия токов, будет равна паре, производимой упругостью подвешивающего приспособления, пропорциональной углу за-

кручивания α . Отсюда получается условие равновесия [формула (21)]:

$$i \cdot i_1 = k \alpha;$$

в k входят различные постоянные прибора. Если катушки соединены последовательно, то по ним проходит один и тот же ток $i = i_1$, и мы получаем:

$$i^2 = k \alpha, \text{ или } i = C \sqrt{\alpha},$$

т.е. величина тока, идущего по электродинамометру, пропорциональна корню квадратному из угла отклонения.

Такой прибор также может быть градуирован на амперы, а если он имеет большое сопротивление, то может быть включаем, как вольтметр, и иметь в себе соответственную шкалу вольтов.

Ваттметр измеряет ватты данного отрезка ab цепи. Он представляет собою электродинамометр, одна катушка которого, например, A , включается прямо в цепь (амперная обмотка), другая же B (рис. 47) в ответвление исследуемому участку цепи (вольтовая обмотка); эта последняя должна иметь большое сопротивление. Равновесие

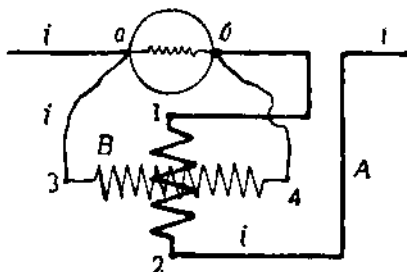


Рис. 47.

прибора после отклонения катушки выражается опять формулой:

$$i i_1 = k \alpha,$$

где i — ток в A , т.е. ток в цепи, i_1 — ток в B равный напряжению участка E_{ab} деленному на r_2 — сопротивление вольтовой обмотки (велич. постоянная); таким образом получаем:

$$i \cdot E_{ab} = (r_2 \cdot k) \alpha,$$

т.е., что угол отклонения катушки B измеряет произведение амперов на вольты, дает ватты между точками a и b .

Ваттметр градуируется помощью амперметра и вольтметра; последний должен быть включен между теми же точками цепи, между которыми включена вольтовая обмотка ваттметра.

Струнный гальванометр представляет собою проволоку mn , протянутую между полюсами весьма сильного электромагнита (рис. 48); самый незначительный ток, пропущенный по этой провол-

локе, уже заставляет ее деформироваться, прогибаться под действием электромагнитных сил; ее прогибы измеряются микроскопом. Такой гальванометр может показывать миллион — миллионные части ампера ($10^{-12} A$) и соответственно ничтожные доли вольта.

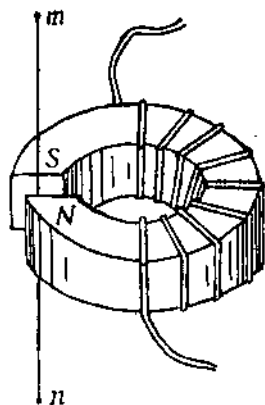


Рис. 48.

Ампер- и вольтметры с железом состоят из соленоида, втягивающего кусок мягкого железа в места наиболее сильного поля; ток или напряжение измеряются по той степени, с которой железо втягивается против сил механической оттяжки, возвращающей его в первоначальное положение (Дюво-Добровольский).

При хорошем гальванометре электромагнитного типа чувствительностью, например, в $10^{-4} A$ на одно деление, часто имеются приспособления, позволяющие пользоваться им в очень многих случаях; для этого служит набор шунтов (стр. 50, пример 3), все меньшего сопротивления, включение которых параллельно гальванометру позволяет измерять токи в тысячи и миллионы раз большие, чем те, для которых служит сам гальванометр; он является уже амперметром и даже на большие амперы. На рис. 49 изображен шунтовой амперметр; по схеме это гальванометр настолько чувствительный, что

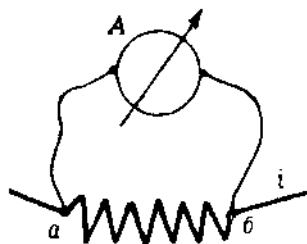


Рис. 49.

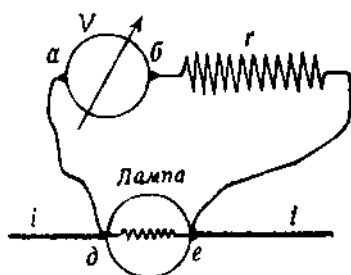


Рис. 50.

он измеряет вольты у концов очень малого сопротивления ab . При больших токах i это сопротивление берется порядка 0,01 и 0,001 Ω .

Кроме того при гальванометре часто имеется большое сопротивление r , включаемое уже не в ответвлении, но последовательно с ним для превращения его в вольтметр; шкала вольтов наносится так что прибор своими отклонениями измеряет вольтаж не у своих зажимов ab (рис. 50), но у концов de всей системы, состоящей

из него и этого добавочного сопротивления, включаемой, как один вольтметр. По схеме видно, что мы опять имеем гальванометр настолько чувствительный, что он измеряет ток в ответвлении с очень большим сопротивлением. При больших вольтах между d и e берут r в сотни тысяч омов.

14. Пример. Проводник в метр длиной, чрез который идет ток в 30 А, лежит на земле перпендикулярно силам горизонтальной составляющей земного магнетизма ($H=0,16$) и имеет возможность двигаться вертикально вверх; ток его направлен таким образом, что горизонтальная составляющая поднимает проводник. Какой величины усилие, поднимающее проводник?

$$Hli = 0,16 \cdot 3 \cdot 100 = 48 \text{ дин., т.-е. } 0,0489 \text{ г — веса.}$$

ГЛАВА VI.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ.

1. Электромагнитная индукция. Явления электромагнитной индукции приводят нас к четвертому основному положению в учении об электричестве, если за первые три считать выражения для потенциальной энергии тока, для закона Ома и для электромагнитной силы [формулы (1), (4) и (20)]. Открытие электромагнитной индукции чрезвычайно расширило сведения об электричестве и привело к предсказанию явлений совсем иного типа, чем ток по проводнику: электрических колебаний и электромагнитных волн; в практическом отношении это открытие привело к изобретению динамомашины, к пониманию электродвигателей, к обладанию переменными токами и к изобретению беспроволочного телеграфа.

2. Открытие индуктированного тока. Открытие электромагнитной индукции совершилось, как результат размышления над явлениями электромагнитной силы, изложенными в предыдущей главе. Они учат, что электрический ток всегда сопровождается магнитным полем, что текущее электричество производит магнитный поток; естественно предполагать возможность обратного: с помощью магнитного потока произвести электрический ток, заставить электричество течь, т.-е. с помощью магнитного поля создать разность потенциалов.

Многие выдающиеся физики с 1822 г. работали над этой задачей; некоторые из них близко подходили к ее разрешению (Ампер, Френель, Араго и особенно Генри), но действительное открытие электромагнитной индукции во всей ее полноте выпало на долю величайшего экспериментатора М. Фарадея. После четырех неудачных попыток (в 1824, 1825 и 1828 гг.) Фарадей открыл электромагнитную индукцию летом 1831 г. В течение десяти экспериментаторских дней, к ноябрю того же года, явление раскрылось перед наблюдателем во всем своем размере.

Явление это очень просто и легко воспроизводимо: возьмем катушку из проволоки, замкнутую проводниками на гальванометр Γ (рис. 51); в нее не включено элемента, в цепи нет эдс, и гальванометр стоит на нуле. Но стоит лишь вдвигать в нее магнит, например, северным полюсом — гальванометр покажет прохождение тока; следовательно, теперь в цепи существует электродвижущая сила; это и есть эдс электромагнитной индукции. Если будем вынимать магнит, опять пойдет ток, но уже обратного направления. Вдвигая магнит его южным полюсом, получим то же самое, но направление тока при вдвигании южного полюса будет то, которое было при вынимании северного, и наоборот.

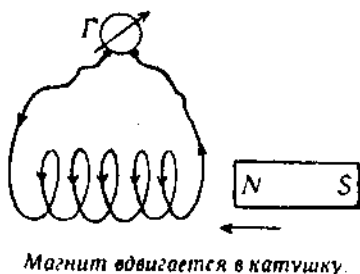


Рис. 51.

Все произойдет в том же виде, если мы будем надвигать катушку на неподвижный полюс магнита; имеет значение лишь относительное движение.

Чем быстрее это относительное движение катушки и магнита, тем больше ток, и, следовательно, большая индуцируется эдс (но явление занимает, конечно, меньший промежуток времени).

Очевидно, то же самое должно происходить, если вместо магнита взять электромагнит, так как оба они тождественны по характеру своих магнитных полей. Опыт вполне подтверждает это. Пользуясь электромагнитом, можно произвести явление другим способом: оставив его (рис. 52) неподвижным в катушке I , разомкнем ключом K ток от батареи, намагничивающий наш электромагнит: в течение короткого времени гальванометр Γ показывает большое отклонение; по цепи Γ быстро пробежал ток. При замыкании ключа K наблюдаем отклонение в обратную сторону.

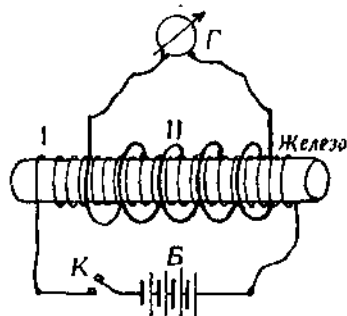


Рис. 52.

Цепь, намагничивающая электромагнит, называется первичной; цепь, по которой идет индуцированный ток, называется вторичной.

Размыкание и замыкание первичного тока можно считать похожими выниманию и вкладыванию магнита; они могут дать большее

отклонение на гальванометре, большой индуцированный ток, так как механически проще — быстро разомкнуть или замкнуть ключ K , чем вынуть или вложить магнит, а мы видели, что эдс индукции зависит от скорости, с какою происходит явление.

В этом и заключается все явление. Главная причина 10-летних неудачных попыток открыть его состояла в том, что ожидали получить индуцированный ток тогда, когда магнит уже находится в катушке. Это ожидание объясняется тогдашним непониманием закона сохранения энергии: магнит не теряет своей силы и энергии, находясь внутри катушки; откуда же могла бы получиться энергия индуцированного тока, т.-е. нагревание вторичной цепи и другие работы, которые могут быть совершаемы током во вторичной? Это было бы удивительнейшим *perpetuum mobile*.

3. Энергия индуцированного тока; направление его. Закон Ленца. Зная истинный характер электромагнитной индукции, мы найдем, откуда получается энергия индуцированного тока, и в то же время поймем, чем определяется его направление.

Обращаемся снова к рис. 51; опыт показывает, что при вдвигании северного полюса в катушку индуцируется ток такого направления, что конец ее, ближайший к полюсу магнита, оказывается одноименным с ним, в данном случае — северным. Катушка действием индуцируемого в ней тока отталкивает магнит, *мешает* ему приближаться к ней. Было уже сказано, что при удалении того же полюса индуцируется обратный ток; ближайший к магниту конец катушки оказывается, значит, южным полюсом; теперь катушка притягивает магнит, т.-е. опять же *мешает* ему удаляться.

Следовательно, если при относительном движении магнита и катушки индуцируется ток, то этому движению появляется особая помеха; *ток индуцируется всегда такого направления, что мешает относительному перемещению магнита и катушки*. Это правило впервые установлено Ленцом в Петербурге (1834 г.).

То, что движет магнит (или катушку), должно преодолевать эту помеху, совершать соответственную работу; все, что производит индуцированный ток, вся его энергия и равна в точности этой работе.

Мы видим, что работа индуцированного тока производится за счет энергии того двигателя, который производит относительное движение магнита или катушки. Мы видим также, что этим определяется и направление индуцированного тока.

4. Основной случай электромагнитной индукции. Явления, описанные в предыдущем параграфе, слишком тесно связаны с опре-

деленными приборами, как катушка, магнит. Если остановиться на этом описании, то мы сможем разобраться лишь в тех случаях, где имеются эти приборы. Необходимо уловить основной характер явления, в котором выступает закон природы; тогда станут понятны всевозможные частные случаи. Мы придем к этой цели, если обратимся от самого магнита к магнитному потоку, окружающему его.

Когда магнитный полюс приближается к катушке (или наоборот), магнитный поток перерезывается ее витками, или ее витки перерезают линии этого потока (рис. 53). То же самое происходит и во всех других случаях. Следовательно, в катушке индуцируется эдс, когда ее витки перерезывают магнитный поток.

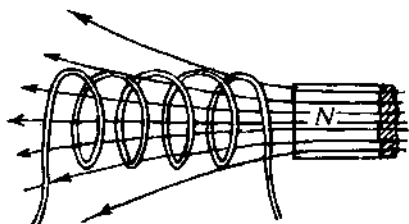


Рис. 53.

Во всех витках это явление происходит одновременно; индуцируемые в них эдс складываются, как слагаются эдс гальванических элементов, соединенных последовательно. Более простым случаем представляется один виток проволоки, надеваемый на магнит. Но и здесь эдс складывается, как сумма эдс, появляющихся в отдельных элементах витка, так как каждый из них участвует в явлении, пересекая соответственные, попадающие на его пути, линии магнитного потока. Простейшим, неразложимым уже случаем является эдс, возникающая в элементе, бесконечно малом отрезке проводника, перерезывающем магнитный поток.

К такому основному элементу явления и пришел Фарадей; в своем опыте 4 ноября 1831 г., последнем опыте на электромагнитную индукцию, он убедился, что проволока в $\frac{1}{8}$ дюйма длиною (соединенная проводниками с гальванометром), перерезывая поле между полюсами электромагнита, производит ток.

Разбирая этот простейший случай, мы выведем математический закон, по которому вычисляется индуцируемая эдс. При выводе его нам понадобится выражение для электромагнитной силы; так как это выражение мы знаем лишь для потока перпендикулярного к проводнику, то только к такому расположению, самому важному для понимания сути дела, мы и обратимся.

Б. Закон, выражающий индуцированную эдс. Пусть в магнитном поле (рис. 54) H ($\mu = 1$) находится прямолинейный проводник длиною l (он может быть бесконечно короток), перпенди-

кулярный к потоку. Если через этот проводник, соединенный проводами с батареею B , проходит ток, то на него действует электромагнитная сила ¹⁾

$$F = H i l,$$

где i означает величину тока в цепи батареей. Эта сила, как всегда, стремится двигать проводник поперек поля, заставляя его перерезывать линии потока, и именно, в условиях, указанных стрелками на рис. 54, — в направлении от смотрящего на чертеж.

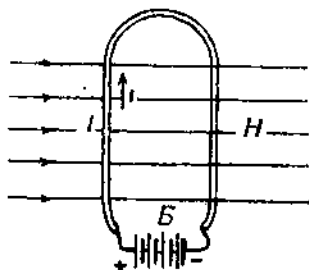


Рис. 54.

Пусть под влиянием этой силы за время t проводник с равномерною скоростью опишет в указанном направлении перпендикулярно к плоскости чертежа путь s . При этом будет совершена работа w :

$$w = F s = H i l s.$$

Но $l s$ равно площади, описанной проводником l при его движении. Помножив эту площадь на H , мы определяем, сколько проходит сквозь нее силовых линий, так как H есть число силовых линий, приходящихся на единичную площадь. Это произведение $H l s = \Phi$ дает, следовательно, полное число силовых линий или (в воздухе), полный поток, перерезанный проводником за время t . Мы получаем, что работа, совершенная при движении проводника, равна

$$w = \Phi i.$$

На основании закона сохранения энергии мы ищем источник энергии, необходимой для совершения этой работы. Ни магнитный поток, ни проводник не теряют своей энергии; следовательно, единственным источником должна быть признана батарея. В данном случае, она является двигателем и в то же время производит нагревание — неперменное следствие существования тока. Мы знаем (стр. 28), что вся энергия, выделяемая движущимся электричеством, вся работа генератора равна

$$EQ = E i t,$$

где E обозначает полную эдс в цепи, производимую батареею; одна часть этой энергии идет на джоулево тепло, другая — на работу w .

¹⁾ Необходимо ясно различать механическую „электромагнитную силу“ от индуцированной эдс, см. § 14.

Напишем это в виде уравнения

$$Eit = i^2 Rt + w = i^2 Rt + \Phi i,$$

где R означает *полное* сопротивление цепи. Сократив это уравнение на it , получаем

$$E = iR + \frac{\Phi}{t},$$

или после решения относительно i получаем:

$$i = \frac{E - \Phi/t}{R}. \quad (22)$$

Таково уравнение разбираемого процесса. В нем участвует и электромагнитная индукция, так как происходит перерезывание линий потока. Батарея играет роль только того внешнего двигателя, который всегда необходим при относительном движении проводника и магнитного поля в случае электромагнитной индукции (стр. 116).

Уравнение (22) представляет собою закон Ома; в знаменателе правой части мы имеем обычное сопротивление цепи; в числителе ее — эдс батареи и рядом с ней, а, следовательно, тоже некая эдс, величина

$$e = \frac{\Phi}{t}; \quad (23)$$

эта величина пропадает, если $\Phi = 0$, т.-е., если не происходит перерезывания силовых линий; отсюда следует, что e и есть искомая нами индуктированная эдс.

Итак, *эдс индукции равна числу линий индукции, перерезываемых проводником за единицу времени*, иными словами, она равна *скорости перерезывания силовых линий* при $\mu = 1$.

Это и есть основной закон электромагнитной индукции, выведенный по Гельмгольцу (1847).

6. Динамомашина и электродвигатель. То, что изображено на рис. 54, представляет собою идею электродвигателя: механическое движение производится электрическим источником энергии. Мы видим, что при этом ток идет не по тому простому закону Ома, о котором говорилось в главе II, но по формуле (22); появляется индуктированная эдс, как вычитаемое из E , т.-е. обратная по своему направлению эдс от батареи. Она уменьшает ток от батареи, уменьшает, следовательно, силу $F = Hi$, мешает движению. В этом выражается правило Ленца.

Можно представить себе проводник l замкнутым на цепь, не заключающую в себе генератора. В таком случае (рис. 55), чтобы проводник задвигался поперек поля, необходим другой какой-либо

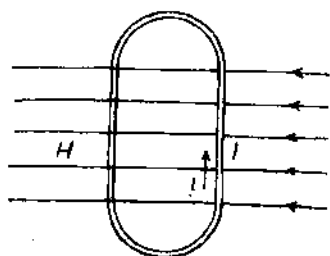


Рис. 55.

двигатель, например, механический. Если помощью этого механического двигателя проводник будет двигаться, например, опять в сторону от нас и с прежней скоростью, в нем будет индуцироваться та же самая эдс

$$e = - \frac{\Phi}{t},$$

но она будет уже единственной и дает ток, равный

$$i_1 = \frac{e}{R}.$$

Направление этого тока (рис. 55) таково, что на проводник действует электромагнитная сила, направленная к нам, т.-е. мешающая движению проводника. Таким образом, и здесь повторяется правило Ленца.

Рис. 55 изображает идею динамомашины; здесь механический двигатель производит электрический ток.

На рис. 54, как и 55 предполагается движущимся проводник l , т.-е. левая половина схематически изображенной цепи; правая остается неподвижной. Если бы правая половина контура рис. 55 перерезывала силовые линии, двигаясь в одну сторону с левой, то в ней индуцировалась бы такая же эдс, направленная тоже вниз, и обе эти эдс уничтожались бы взаимно. В цепи не индуцировался бы ток, так как внутри ее контура не изменялось бы число силовых линий (ср. стр. 123). Точно также, если бы правая половина контура рис. 54 находилась в том же поле, что и левая, то движения не произошло бы (контур только установился бы поперек силовых линий).

Теперь мы понимаем, почему одно учение об электромагнитной силе недостаточно для понимания движений, происходящих под ее действием: при всяком электромагнитном движении индуцируется ток, обратный тому, который производит это движение, и понятный только на основании теории электромагнитной индукции. Мы понимаем также, на счет чего производится отклонение магнита в гальванометре с магнитом или подвижной катушки в гальванометре с по-

движной катушкой. Во всех этих случаях батарея, дающая ток, *во время отклонения* производит ток не просто по закону Ома, но по формуле (22), т.-е. меньший, а, следовательно, дает меньшее нагревание; часть ее работы уходит именно на механическое передвижение.

Но для теории приборов в их статическом состоянии, когда отклонение уже совершено, знание электромагнитной индукции не имеет никакого применения.

Изображенный на рис 54. и 55 прибор представляет собою не только лабораторную схему для демонстрации принципа электродвигателя и динамомашин. Рис. 55-а схематически изображает технический прибор, по своему существу совершенно совпадающий с тем, что представляют рис. 54 и 55. В магнитном поле между полюсами N и S помещена металлическая ленточка A , закрепленная в зажимах k_1 и k_2 , гофрированная и потому очень легко прогибающаяся. Если пред

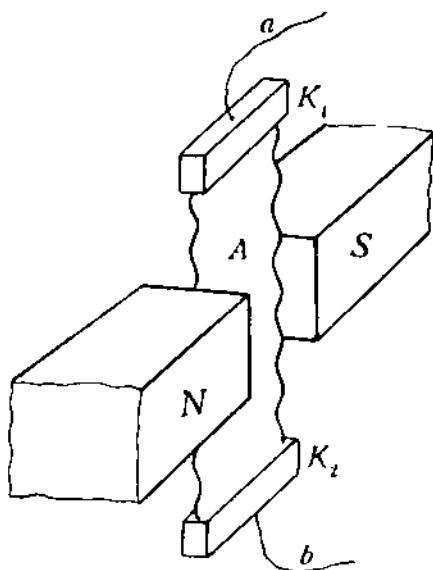


Рис. 55а.

нею говорят, волнение воздуха прогибает ее: она дрожит в строгом соответствии с проходящими звуками. Вследствие пересечения ленточкой магнитного поля в ней индуктируются эдс, которые и дают в линии ab соответственные токи. Если в цепь ab включен телефон, то в него услышат то, что говорится перед A .

Все устройство представляет собою динамомашину; она действует здесь за счет энергии звуков, издаваемых говорящим. Такой прибор может быть назван микрофоном.

Если же, наоборот, по проводам ab проходят телефонные токи, производимые каким-либо другим микрофоном, то ленточка A , подчиняясь электромагнитным силам, будет колебаться в точном соответствии с этими токами и производить в окружающем воздухе соответствующие звуки.

Все устройство представляет собою в этом случае электродвигатель, производящий механическую работу (над воздухом) на счет электрической энергии. Такое устройство может быть названо громкоговорителем.

7. Примеры на вычисление индуктированной эдс. В следующих двух примерах применяются все наши сведения относительно электромагнитной индукции для случая проводника, перпендикулярного полю.

А. Горизонтальная составляющая земного магнетизма в Ленинграде имеет напряжение 0,16; проводник, длиною в 1 м, пересекает это поле, оставаясь все время перпендикулярным к его силовым линиям; он движется со скоростью 60 км в час. Какая эдс индуктируется в нем при этом?

Так как $\mu = 1$, то:

$$e = \frac{\Phi}{t} = \frac{l s \cdot H}{t} = \frac{100 \cdot 60 \cdot 10^5 \cdot 0,16}{60 \cdot 60} = 2,6 \cdot 10^4.$$

Все это — в системе CGS; чтобы вычислить ответ в вольтах, следует полученную величину уменьшить в 10^8 раз, т.-е.

$$e = 2,6 \cdot 10^{-4} V = 0,00026 V.$$

Если бы мы знали, далее, на какое сопротивление замкнут наш электромагнитный генератор, мы могли бы вычислить величину тока по закону Ома. Но это уже не относится к настоящей главе.

Б. В предыдущем примере было задано слишком слабое поле; с ним нельзя генерировать вольты практической величины.

Возьмем поле, полученное нами для рис. 37-а, т.-е. $H = 1040$, и спросим себя с какою скоростью должно двигать проводник длиною в 10 см перпендикулярно силовым линиям этого поля, чтобы получить 0,1 V = 10^7 CGS.

Согласно предыдущим обозначениям скорость $v = \frac{s}{t}$.

$$e = \frac{\Phi}{t} = \frac{l \cdot s H}{t} = l \cdot H \cdot v; \quad 10^7 = 10 \cdot 1040 v;$$

откуда $v = 960$ см/сек, или 34,6 км в час.

Мы увидим, что в динамомашине такие короткие проводники, при подобной же скорости дают гораздо большие вольты вследствие еще более сильного поля, а также большего числа проводников, одновременно пересекающих магнитный поток.

8. Индукционная катушка. Общее выражение закона Ленца.

Когда магнит вводится в катушку (рис. 52), в каждом элементе каждого ее витка индуцируется эдс, равная числу пересекаемых этим элементом линий магнитного потока за ед. времени; во всем витке эдс, составляющаяся из элементарных, равна числу линий, перерезываемых всем витком за ед. времени. Эти линии пересекают его, входя внутрь контура, образуемого витком, или выходя из него при обратном движении магнита; входя, они увеличивают собою магнитный поток внутри контура, выходя — уменьшают его.

Следовательно, мерою эдс, индуцируемой в контуре, можно считать скорость увеличения или уменьшения, а вообще — скорость изменения магнитного потока внутри контура.

Такой способ меры (Максвелла) особенно удобен, когда дело идет не о движении магнита, но об образовании поля первичною цепью внутри вторичной (рис. 52). От скорости, с которою оно образуется или исчезает, при замыкании или размыкании первичной обмотки, зависит эдс e в каждом витке вторичной; во всей же вторичной обмотке индуцируется

$$E_2 = n_2 e,$$

где n_2 — число вторичных витков. Из этого выражения видно, что во вторичной цепи может быть достигнута весьма большая эдс, если вторичную обмотку сделать из соответственного числа витков. Приборы, приготовляемые таким образом, называются индукционными катушками.

Индукционная катушка состоит из первичной обмотки, питаемой несколькими аккумуляторами, или 100-вольтовой сетью; по ней проходит ток такой величины, чтобы внутри ее создавался достаточно густой магнитный поток; для увеличения магнитной проводимости она снабжается сердечником из мягкого железа. Вторичная обмотка наматывается обыкновенно поверх первичной; она состоит из большого числа (десятки тысяч) витков весьма тонкой, хорошо изолированной проволоки; вследствие этого при каждом замыкании и размыкании первичного тока, на концах вторичной обмотки появляется большая разность потенциалов, могущая дать искру между ними.

Индукционная катушка, могущая произвести искровой разряд в 1 см длиной между шариками (1 см в диаметре), производит эдс в 33 000 V; существуют катушки, дающие искры в 1 м длиной и более; их напряжение исчисляется миллионами вольт.

Таким образом индукционная катушка есть прибор, служащий для получения высокого напряжения; она представляет собою электромагнитный механизм, превращающий электрическую энергию малого напряжения (как мы сказали, от нескольких аккумуляторов или от 100 вольт) в электрическую же — но большего напряжения.

Чтобы узнать направление тока, индуцируемого во вторичной обмотке, мы не можем воспользоваться правилом Ленца в такой форме, какая была придана ему на стр. 119, так как в этом механизме нет относительного перемещения магнита и катушки. Для этого случая мы воспользуемся более общим выражением правила Ленца: *индуцируется ток такого направления, при котором он мешает причине, производящей его.*

Если причину индуцированного тока служит перемещение магнита, он мешает этому перемещению; если же, как в случае индукционной катушки, причиной является возникновение или исчезновение магнитного потока, индукционный ток мешает *этим* изменениям потока, т.-е. в первом случае — производит поле, направленное обратно возникающему полю, во втором — того же направления, что и исчезающий поток. Отсюда следует, что при замыкании первичной цепи во вторичной индуцируется ток *обратный* тому, который идет по первичной и создает ее поле; а при *размыкании* — *прямой*, т.-е. согласный с тем, который только-что шел по первичной; этот-то „прямой“ ток и продолжает существование магнитного потока (противится его прекращению).

Теперь мы можем прибавить к определению индукционной катушки еще то, что она преобразует прерывающийся ток одного направления в ток переменный — двух чередующихся направлений.

Замыкание и размыкание первичной обмотки производится или ею самою, магнетизмом ее сердечника и оттягивающею пружиной, как в обыкновенном электрическом звонке, или же отдельным прерывателем.

9. Взаимная индукция. Когда имеются две обмотки, связанные общим магнитным потоком, и когда, следовательно, всякое изменение тока одной обмотки вызывает индукцию в другой — тогда говорят, что обе обмотки находятся под действием взаимной индукции. Словом „взаимный“ выражается, что изменение тока вторичной обмотки, например, в приборе на рис. 52, вызывает, в свою очередь, возникновение тока в первичной.

Поставить обмотки под взаимную индукцию можно не только тем способом, который изображен на рис. 52, но и различными

другими, например, по схеме рис. 56; здесь обе катушки навиты на общий железный тороид; магнитное поле, производимое одною из них (А), проводится железом внутри другой (В). На таком именно приборе Фарадей исследовал индукцию тока током (стр. 115).

Выразим магнитный поток Φ первичной обмотки через n_1 — число ее витков и k — ее магнитное сопротивление по формуле стр. 103 т.е. напишем:

$$\Phi = \frac{4\pi n_1}{k} i;$$

представим скорость изменения этого потока через производную Φ по t , т.е.

$\frac{d\Phi}{dt}$; тогда эдс в каждом витке вторичной обмотки получится в виде:

$$e = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{4\pi n_1}{k} \cdot \frac{di}{dt};$$

а эдс во всей вторичной обмотке будет иметь выражение:

$$E_2 = n_2 e = \frac{4\pi n_1 n_2}{k} \cdot \frac{di}{dt} = M \frac{di}{dt}.$$

Мы выразили процесс через „производную тока по времени“; это и есть скорость изменения первичного тока, от которой зависит и скорость изменения потока; она может изменяться от момента к моменту, и наше выражение для E_2 дает эту величину для всякого данного момента. И в действительности при разбираемом явлении (рис. 56 или 52) первичный ток изменяется сначала быстро, а затем все медленнее. Если бы мы имели гарантию того, что ток, а, следовательно, и поток изменяются равномерно за время t своего изменения, то мы написали бы более элементарное выражение:

$$E_2 = n_2 \frac{\Phi}{t} = M \frac{J}{t},$$

где J означает тот окончательный или начальный ток, который образуется от нуля или исчезает до нуля за время t . В этом случае производная равна постоянной величине:

$$\frac{di}{dt} = \frac{J}{t}.$$

Величина M , зависящая исключительно от конструкции прибора и не зависящая от тока или скорости его изменения, называется

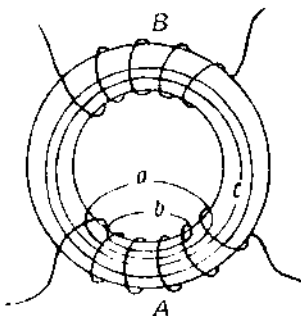


Рис. 56.

коэффициентом взаимной индукции; в практической системе она измеряется в генри или квадрантах, а в системе CGS — в *с.м.*

Генри, или квадрант = 10^9 *с.м.*

Выражение с M показывает, что коэффициент взаимной индукции численно равен эдс, появляющейся в индуцируемой цепи, при единичной скорости изменения тока (в индуцирующей цепи), в практической системе — при изменении его на 1 А в секунду.

Выражение для коэффициента взаимной индукции, написанное выше, относится к идеальному случаю, когда каждый виток вторичной обмотки охватывает весь поток, создаваемый первичной. На практике это не имеет места; происходит рассеяние некоторого числа силовых линий по кратчайшему пути через воздух, как линия a на рис. 56, ¹⁾ и взаимная индукция не бывает столь большой, как нами предполагалось.

10. Самоиндукция. Кинетическая энергия тока. Супрапроводники. Когда в какой-либо катушке изменяется ток, она индуцирует эдс во всякой другой, охватывающей ее магнитное поле. Но в такой же мере и в каждом ее витке происходит индукция, так как и внутри ее витков тоже изменяется магнитный поток. Это явление называется самоиндукцией.

Если в каждом витке появляется эдс e , то во всех n_1 витках индуцируется:

$$E_1 = n_1 e.$$

Выразив e , подобно предыдущему, через скорость изменения тока, мы получим

$$E_1 = \frac{4\pi n_1^2}{k} \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt}.$$

Величина L называется коэффициентом самоиндукции и измеряется в генри (квадрантах) или в *с.м.*

Выражение с L показывает, что коэффициент самоиндукции численно равен эдс, появляющейся в цепи при изменении ее тока с единичною скоростью, в практической системе на 1 А в секунду.

На практике коэффициент самоиндукции не столь велик, так как

¹⁾ Это рассеяние необходимо появляется вследствие того, что поток ищет наиболее легкого пути. Если бы тороид, на который надеты катушки A и B рис. 56, был сделан не из магнитного материала, а, напр., из дерева, то рассеяние было бы очень большим, и лишь малая часть потока попадала бы внутрь B .

часть линий потока проскальзывает между витками, как линия b на рис. 56, и не служит поэтому для индукции во всех витках n_1 .

Явление самоиндукции имеет громадное значение для понимания электрических колебаний. Ею обладают не только катушки, но, конечно, и всякий один виток, т.-е. всякая замкнутая цепь. Катушка, да еще с железным сердечником, т.-е. электромагнит, отличается лишь особенно большою самоиндукцией, так как производит густой магнитный поток (вследствие большого n_1 и малого k).

Всякий проводник, образующий своим током магнитное поле, обладает самоиндукцией; практически лишенным самоиндукции можно считать лишь такой провод, в котором прямой и обратный токи свиты друг с другом так, что образуют вокруг себя ничтожно слабое поле.¹⁾

Вследствие самоиндукции при каждом замыкании или, вообще, увеличении тока в цепи индуктируется обратный ток, мешающий увеличиваться току и возрастая магнитному полю; при каждом размыкании или, вообще, уменьшении тока индуктируется прямой ток, стремящийся помешать исчезанию тока и магнитного поля. Эти индуктированные токи, следовательно, замедляют время возникновения тока и время его исчезновения, и нельзя поэтому думать, что ток возникает или исчезает сразу весь в те самые моменты, когда мы замыкаем или размыкаем цепь.

В цепи с большою самоиндукцией это замечается даже при грубых способах наблюдения. При размыкании тока сильных электромагнитов в месте размыкания проскакивает яркая искра; генератор, дававший ток, неспособен своими вольтами произвести такой искры; она производится самоиндукцией, напряжение которой может быть очень велико, так как зависит от n_1^2 .

Объяснив искру размыкания индукцией, Фарадей дал первые понятия о самоиндукции.

Обратим внимание на следующую весьма важную аналогию. Данная эдс лишь мало-по-малу придает цепи, на которую она замкнута, тот ток, который соответствует сопротивлению проводов; это происходит вследствие самоиндукции цепи. Точно также и механическая сила лишь мало-по-малу сообщает телу ту окончательную скорость, при которой сила уравнивается сопротивлениями движению, и при которой дальнейшее ускорение не будет иметь места;

¹⁾ Напр., шнуры, питающие лампу накаливания.

это постепенное увеличение скорости происходит от инерции тела. Поэтому мы с полным правом можем определить самоиндукцию, как инерцию электрического тока.

Максвелл, знаменитый истолкователь Фарадея, получивший на основании его теории новое объяснение световых явлений, спрашивает себя: „Что делает эдс в течение того времени, когда противопоставленное ей сопротивление не может ее сбалансировать?“, т.-е. пока ток идет меньший, чем это соответствует сопротивлению. Механическая сила, давлением на тело сообщая ему ускорение, придает телу кинетическую энергию или способность исполнить работу на счет своего движения, когда оно станет прекращаться. Совершенно также и та часть работы генератора, которая не пошла на сопротивление, была обращена на увеличение кинетической энергии тока. При установлении тока запасается его кинетическая энергия. При его прекращении, когда генератор уже не действует, когда ток продолжается по инерции, провода некоторое время еще нагреваются, может-быть, совершаются и механические работы — отклоняются магниты и т. п. — пока хватит этой запасенной энергии; она теперь тратится. В самоиндукции цепи выражается ее электрическая инерция и кинетическая энергия тока.

Но существенна и разница между инерцией, кинетическою энергиею тока и механическою инерциею с ее кинетическою энергией. Мы видели, что самоиндукция при возникновении или прекращении одного и того же тока J (при одной и той же величине $\frac{dI}{dt}$) может быть весьма различною, смотря по тому, какую форму имеет провод (шнур или соленоид), и имеется ли железо в окружающей среде (соленоид или электромагнит). Тут важны геометрические и физические свойства пространства, которое проводник оставляет вокруг себя; инерция тока и его кинетическая энергия *находятся вне тока*, потому что заключаются в его магнитном поле. При возникновении тока запасается энергия его магнитного поля; при прекращении тока эта магнитная энергия служит источником всех явлений. Максвелл разъяснил, что никакой второй инерции, инерции в самом электричестве тока, не имеется. Тогда как вода, напр., несет именно в себе свою кинетическую энергию. Это ясно показывает, до какой степени осторожны должны мы быть в наших выводах из обычного, удобного и в некоторой степени несомненно истинного представления о „токе“, как о чем то текущем. Лишь опыт может руководить нами в этих вопросах.

Что будет, если ток предоставлен самому себе в цепи, не имеющей сопротивления и не заключающей в себе никаких других элементов? На аналогичный вопрос из механики: что будет с телом, обладающим известной скоростью, на которое не действуют ни силы, ни сопротивления — ответом служит: оно будет двигаться вечно. К счастью, имеется уже опытный ответ на вышепоставленный вопрос по электричеству. В последние годы Камерлинг-Оннес, в Лейдене, получил очень низкие температуры, при которых металлы обладают неизмеримо малым (стр. 39) сопротивлением (супрапроводники). Катушка из свинцовой проволоки, имевшая при обычных температурах сопротивление в 734 ома, была помещена в магнитное поле, перпендикулярное плоскости витков, и охлаждаема жидким гелием до $1,8^{\circ}$ кельвина (абс. температура); когда затем это поле ($H = 200$ гаусс) было вынуто из катушки, то индуцированный этим движением ток (в несколько десятых ампера) был наблюдаем неизменяющимся в течение часа; в другом опыте не наблюдалось никакого уменьшения тока в течение $2\frac{1}{2}$ часов; эти сроки обуславливались единственно необходимостью возобновить порцию охлаждающего гелия. Наблюдение тока производилось, конечно, не гальванометром, включенным в цепь катушки; малейший проводник, не приведенный в состояние супрапроводимости, находясь в цепи катушки, мгновенно поглотил бы всю инерцию тока; катушка находилась вся в криостате и была замкнута сама на себя. Ее ток измерялся по отклонению магнитной стрелки, установленной вблизи криостата. Ее непрекращающийся ток по справедливости считается опытной иллюстрацией амперовских молекулярных токов (со стр. 283).

11. Роль самоиндукции в индукционной катушке. Большая самоиндукция первичной обмотки препятствует току ее быстро установиться, или, иными словами, полю ее — быстро образоваться. Это уменьшает $\frac{di}{dt}$, уменьшает эдс, индуцируемую во вторичной обмотке.

Та же самоиндукция первичной обмотки мешает также ее току и полю быстро исчезнуть при размыкании прерывателя. Но ток самоиндукции при размыкании встречает препятствие в виде воздушного промежутка, появляющегося в месте прерывания; это уменьшает его действие, не позволяет ему продолжаться так долго, как при замыкании. Поэтому исчезновение поля индукционной катушки происходит быстрее, чем его возникновение. Подробн. см. гл. IX, § 12, стр. 184.

Эдс во вторичной обмотке E_2 , появляющаяся при размыкании, всегда больше, чем та, которая появляется при замыкании, особенно, если размыкание производится механически с возможно большою быстротою.

Если вторичная обмотка индукционной катушки производит наибольшую искру, какую только в состоянии дать, то возможно с уверенностью утверждать, что эта искра появляется только в момент размыкания.

12. Токи Фуко. Обыкновенно отличают еще один случай электромагнитной индукции, а именно тот, когда путь индуцируемого тока не определяется явною формою проводника в виде проволоки; когда ток индуцируется во всей массе неподразделенного куска металла, молекулы которого перерезывают магнитный поток.

Если двигать, например, медный предмет поперек магнитного поля, то легко заметить, что он нагревается, и что его движение встречает какое-то особое препятствие, как будто бы он двигался в весьма вязкой жидкости. Эти явления тем ярче обнаруживаются, чем сильнее магнитное поле, и чем быстрее мы стремимся перерезать его.

Явления объясняются тем, что во всей массе металла индуцируются токи по правилу Ленца, препятствующие движению; работа, идущая на преодоление этого препятствия, превращается в джоулево тепло этих токов, называемыми токами Фуко.

Обратно, если к движущемуся магниту, например, качающемуся, как маятник, поднести медный предмет, то магнит остановится, а медь нагреется теплом, эквивалентным живой силе, которою обладал магнит.

В индукционной катушке исчезающее и возникающее магнитное поле индуцирует токи во всей массе железного сердечника,¹⁾ помещаемого, как мы упоминали, внутри первичной обмотки. Железо нагревается, и это представляет собою совершенно напрасную трату энергии магнитного потока, которую мы желали бы всю использовать во вторичной обмотке. Опыт показывает, что паразитные токи могут быть почти уничтожены, если сердечник подразделить на части, параллельные оси катушки.²⁾ Поэтому сердечник индукционной катушки готовится всегда в виде пучка тонких железных про-

¹⁾ Эти токи часто называются паразитными токами; здесь не происходит относительного движения магнита и проводника, как при токах Фуко.

²⁾ Такое подразделение несколько не мешает сердечнику служить проводником для магнитного потока, идущего вдоль оси обмотки.

волок, изолированных друг от друга; достаточную изоляцию служит слой окисла на поверхности проволоки.

13. Магнитные успокоители. Во многих электрических приборах, как и в приборах различных других категорий, например, весах, приходится ждать остановки подвижной части; она не останавливается сразу в том положении, где уравниваются отклоняющая и возвращающая силы, но по инерции переходит его, затем возвращается, опять переходит и т. д.; при значительной массе подвижной части, как магнита в тангенс-гальванометре, эти колебания продолжаются довольно долго. В настоящее время в очень многих приборах подвижная часть снабжается небольшим алюминиевым листочком, помещающимся между полюсами подковообразного магнита; при всяком ее движении в листочке индуцируются токи, мешающие этому движению. Такое *магнитное успокоение* несколько замедляет движение подвижной части к положению своего нового равновесия, но зато так значительно уменьшает ее скорость в последний момент этого движения, что переход через положение равновесия почти незаметен; указатель без колебаний показывает то, что нужно отсчитать, и остается неподвижным в этом положении.

В чувствительных гальванометрах с подвижной катушкой при движении ее между полюсами магнита в ней самой индуцируется эдс, останавливающая ее движение. Если гальванометр чувствительный, если его магнит силен, а главное: цепь, в которую прибор включен, малого сопротивления и с малой эдс, то индукция в катушке не позволяет ей двигаться иначе, как чрезвычайно медленно. В таких условиях не только не может быть колебаний около положения равновесия, но и самое приближение к нему, т.-е. показание гальванометра достигается лишь чрез десятки минут и больше.

Все это показывает, какие сложные детали вызываются индукцией в действии электромагнитных приборов.

14. Магнетоиндукция и вольтаиндукция. Электромагнитная сила и электромагнитная индукция обе выражают связь между магнитным полем и электричеством. Но необходимо отчетливо понимать различие между ними.

Первая представляет собою взаимодействие магнитного поля и текущего электричества и служит, по изложенному выше представлению, доказательством того, что электрический ток всегда сопровождается магнитным полем. Действие постороннего магнитного поля на поле от тока, или, как выражаются, действие поля на *ток*, передается и тем телам, по которым этот ток протекает; совершенно

также и обратное действие тока на магнитное поле магнита передается и на само вещество магнита. Таким образом, электромагнитная сила есть обычная механическая сила, движущая обычные весомые предметы, как медную проволоку или стальной стержень, а за ними и всякие другие тела, которые с ними механически связаны. Электромагнитная сила есть сила *пондеромоторная*, сообщающая ускорение телам, преодолевающая трение.

Электромагнитная индукция, наоборот, характерна именно своею *электродвижущею* (электромоторною) силою. Пондеромоторные силы, которые могут появиться при этом, например, если индуктированная эдс производит ток, представляют собою вторичное явление. Это уже не индукция, а электромагнитные силы. В простейшем случае эти силы, согласно основному смыслу правила *Ленца*, — удерживающие, затрудняющие движения, сообщающие отрицательное ускорение. Хотя, как мы сейчас увидим, могут быть случаи и положительного ускорения.

Эти побочные пондеромоторные действия сыграли, однако, важную историческую роль, явившись предвозвестниками фарадеевского открытия электромагнитной индукции. *Араго* открыл в 1824 г., что магнит, горизонтально подвешенный, например, на вертикальной нити близко над горизонтальным диском из чистой меди, будучи выведен из магнитного меридиана, возвращается к положению равновесия после трех — четырех колебаний быстро уменьшающейся амплитуды, как будто его что-то задерживает; если же удалить медный диск, то этот же магнит в приборе *Араго* колебался гораздо свободнее и останавливался лишь после 300 — 400 колебаний. Первое предположение, которое было сделано для объяснения явления, а именно, что в меди диска имеется примесь железа, не подтвердилось химическим анализом меди; были придумываемы различные другие объяснения, но все оказывались неудовлетворительными, явление *Араго* не удалось связать ни с чем известным к тому времени; оно как бы повисло в воздухе. Между тем как все механически понятные следствия его вполне оправдались на опыте, а именно: если к диску, которому придано вращательное движение, вращающемуся по инерции, поднести магнит, то он быстро останавливается, как бы очутившись в среде с большим трением (так называемое электромагнитное торможение); если в приборе *Араго* вращать диск, то подвешенный над ним магнит выйдет из магнитного меридиана и начнет следовать за диском.

Явление электромагнитной индукции делает все это сразу понятным; оно вводит промежуточное звено: индуктированный ток

в металле диска, стремящийся своими пондеромоторными силами, по правилу Ленца, прекратить относительное движение диска и магнита, останавливая магнит, когда диск неподвижен, останавливая диск, когда магнит неподвижен, и приводя магнит в движение, когда он может следовать за диском; и это движение магнита представляет собою прекращение его относительного перемещения. Экспериментаторы с самого начала заметили, что явление Араго лучше всего происходит с серебряными и медными дисками, что, следовательно, оно определяется проводимостью; но никто не мог предположить появления токов в диске, из какого бы хорошего проводника он ни был приготовлен, если он не введен в цепь элемента. Только принцип электромагнитной индукции дал понятие об эдс, производящей эти токи, вызывающие явление Араго.

Подобно тому, как вторичным явлением при электромагнитной индукции могут быть электромагнитные силы, так же и при действии электромагнитной силы может появиться индуцированный ток (см. выше §§ 5 и 6, а также § 8 след. главы), если эти силы вызывают движение.

При самом акте своего открытия и в первых описаниях индукции токов Фарадей различает две разновидности явления электромагнитной индукции:

1. Токи индуцируются в проводнике, когда изменяется положение его относительно магнитов, электромагнитов и вообще проводников с токами.

2. Токи индуцируются в проводнике, когда в других проводниках, находящихся неподвижно в соседстве с первым, происходит замыкание, размыкание и вообще изменение токов.¹⁾

Фарадей назвал первый случай *магнетоиндукцией*, второй — *вольтаиндукцией*. Явление, конечно, может представлять собою и одновременное сочетание этих двух видов индукции.

Различие это существенно для нас и во всем предыдущем оно напрашивалось быть отмеченным. Для магнетоиндукции необходимо движение, требующее затраты работы за все время, пока ток индуцируется, так как он мешает этому движению. Энергия индуцированного тока черпается из работы на движение; энергия магнитного поля при этом не тратится.

¹⁾ Этот вид индукции может быть произведен и магнитом, если он, например, ослабевает, оставаясь на своем месте.

При voltaиндукции именно энергия магнитного поля совершает работу, превращаясь в энергию индуктированного тока. Это особенно ясно на явлении самоиндукции размыкания.

В те времена, когда Фарадей исследовал электромагнитную индукцию, сохранение энергии еще не было основным принципом науки; оно стало таковым лет через 15, отчасти под влиянием изучения законов индукции. Поэтому Фарадей не искал источников энергии индуктированного тока; под причину явления он понимал непосредственно предшествующий процесс, который и старался разгадать, не занимаясь подсчетом энергии, теряемой в „причине“ и выделяющейся в „следствии“. В кульминационном пункте своих работ Фарадей увидел этот процесс в перерезывании магнитных линий проводником или обратно. Эта единая причина для всей громадной области явлений вполне удовлетворила всеобобщающий ум Фарадея. Но если процесс перерезывания совершенно понятен для случая рис. 53 и вообще магнетондукции, то для voltaиндукции он требует добавочных предположений. Мы должны представить себе, например, что когда в проводнике возникает ток, то от его оси, в плоскости перпендикулярной к ней, расходятся возникающие линии магнитного потока, как крути на воде от брошенного камня; вновь возникающие спускают образовавшиеся раньше и, таким образом, происходит поле, соответствующее окончательно установившемуся току. При прекращении его эти линии сжимаются в обратном порядке, сокращаясь в точку на оси проводника. В первом случае линии индукции, перерезывая толщу проводника, возбуждают самоиндукцию замыкания; во втором — перерезывая ее в обратном направлении, служат непосредственно причиной самоиндукции размыкания.

Эти возникающие или идущие к уничтожению линии индукции при своем движении вне тела проводника производят все остальные явления voltaиндукции; на рис. 56 линии *b*, *a*, *c* можно рассматривать, как *последовательные по времени* положения одной и той же линии при замыкании обмотки *A*; на пути между положениями *b* и *c* происходит перерезывание витков обмотки *B*. При прекращении тока *A* эта линия занимает последовательно положения *c*, *a*, *b*. Все это может быть применено и к рис. 52, на котором только затруднительно было бы изобразить последовательные положения линий вследствие близости обмоток друг к другу. Вместо того, чтобы следить за воображаемым движением этих линий, Максвелл просто считает число их внутри контура в каждый момент времени

(стр. 123), основываясь на том, что при обязательной замкнутости линий, число их внутри замкнутого контура не может измениться иначе, как после перерезывания самого контура.

Были предложены другие картины движения потока индукции (например, Д. Д. Томсоном), но во всех остается трудность, разрешение которой, очевидно, заложено очень глубоко в природе вещей; она выступает и при фарадеевском представлении; при перерезывании магнитных линий в явлении магнетоиндукции магнитный поток сохраняет свою энергию; в явлении же вольтаиндукции тот же самый по внешности процесс перерезывания вызывает изменение энергии магнитного поля. Так, например, при замыкании A (рис. 56) во вторичную цепь B посылается энергия в виде магнитного потока. При размыкании линии, сжимаясь, оставляют в цепи B часть своей энергии, эквивалентную работе появляющегося здесь тока.

Токи Фуко, опыт Араго — магнетоиндукция; после остановки магнита медный диск Араго окажется нагретым таким количеством тепла, которое эквивалентно первоначальной кинетической энергии колебавшегося магнита; магнитный поток магнита при этом, разумеется, несколько не ослабнет. Но паразитные токи (§ 12) — вольтаиндукция; сердечник катушки окажется нагретым тем теплом, которое эквивалентно *потерянной* части энергии его магнитного поля; эта часть не обнаружится уже ни в токе самоиндукции первичной цепи, ни в токе, индуктируемом во вторичной.

Теорема Гельмгольца — Кельвина (§ 5), опирающаяся на закон сохранения энергии и явившаяся (1847 и 1848 гг.) даже одним из первых применений его, дала нам основной закон электромагнитной индукции в точной математической формулировке. Однако, легко видеть, что она относится непосредственно лишь к магнетоиндукции, так как предполагает, что „магнитный поток не теряет энергии“ (стр. 118). Она должна быть как-то обобщена, чтобы ее можно было отнести и к вольтаиндукции; это было сделано Кельвином.

Фарадей в начале и конце своих размышлений над индукцией останавливался на мысли об особом состоянии проводников, предваряющем индукцию, которое было названо им „электротоническим состоянием“. Никому не удалось понять, какое физическое явление разумел он под этим термином. Максвелл говорит о Фарадее: „Ходом своих опытов, руководимый мощным напряжением мысли, но лишенный помощи математических выкладок, он был приведен к признанию, что существует что-то, что как мы теперь знаем, пред-

ставляет собою математическую величину, и что может быть названо даже основною величиною в теории электромагнетизма. Но так как он был приведен к этому понятию исключительно явлениями, то и приписал ему физическое существование и предположил его в виде особого состояния вещества“.

Эта математическая величина, действительно обобщающая оба вида индукции, равна произведению

$$Mi,$$

где M зависит от взаимного расположения проводников (коэффициент взаимной индукции), i — ток в индуктирующей цепи. *Изменение этой величины во времени выражает индуктированную эдс.* Оно может происходить от изменения M (магнетоиндукция) или от изменения i (вольтаиндукция). Сюда подойдет и индукция от магнитов, если мы их заменим по теории Ампера соленоидами.

ГЛАВА VII.

ДИНАМОМАШИНА И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

1. Якорь. Динамомашина представляет собою практический способ получения тока путем электромагнитной индукции. В ней должны быть две части; магнит, со своим магнитным полем, и проводник, называемый якорем, перемещающиеся друг относительно друга; обыкновенно перемещается (вращается) якорь, как тело менее массивное, а магниты остаются неподвижными.

Якорь представляет собою цилиндрическое железное кольцо, соединенное спицами с осью, вокруг которой оно может вращаться, оставаясь между полюсами магнита (рис. 57). Это кольцо обматывается большим числом витков проволоки, изолированных от железа и друг от друга; конец последнего витка спаявается с началом первого.

При вращении якоря его обмотка пересекает магнитный поток, в ней индуцируется эдс, которая и даст ток в цепи, если цепь замкнута.

2. Способы возбуждения.

Существуют различные способы получения сильного магнитного потока машины.

Магниты могут быть постоянные (стальные); такие „магнитоэлектрические“ машины в настоящее время не применяются на практике.

Машины с электромагнитами называются „динамомашинами“. Поток, образуемый электромагнитом, выходит из его северного полюса (рис. 58) и, разделяясь на две половины, проходит по обеим половинам железного кольца якоря, оставляя внутреннюю полость его почти лишенную поля.

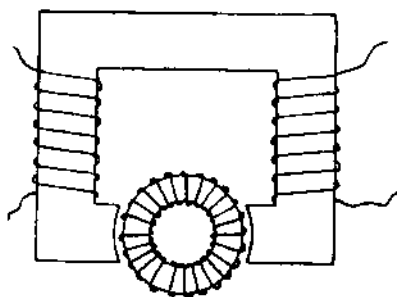


Рис. 57.

Величина потока зависит от магнитодвижущей силы, производимой обмотками электромагнита, и от магнитного сопротивления, представляемого всею магнитною цепью, при чем главная часть сопротивления ее ложится на „воздушные промежутки“, просветы между железом якоря и сердечника электромагнита, необходимые для свободного вращения якоря.

Кроме изображенного на рис. 57 типа магнитной цепи существует еще много других типов, как, например, изображенные на рис. 58 и 59.

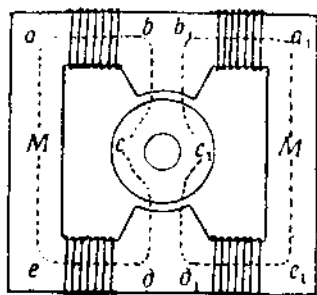


Рис. 58.

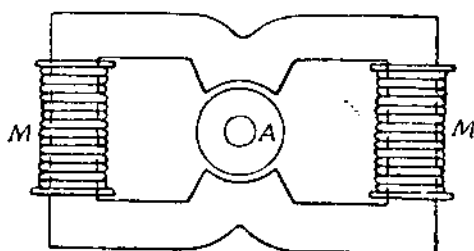


Рис. 59.

Различные способы питания током обмотки электромагнита называются „способами возбуждения“.

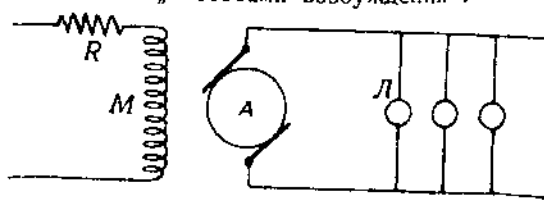


Рис. 60.

а) Возбуждение отдельное, когда обмотка электромагнита, или, говоря короче, электромагнит, питается током постороннего

источника, например, от другой динамомашины. Рис. 60 изображает этот способ, при чем M схематично изображает электромагнит, A — якорь, L внешнюю цепь, питаемую якорем.

б) Возбуждение последовательное, при котором электромагнит включен в

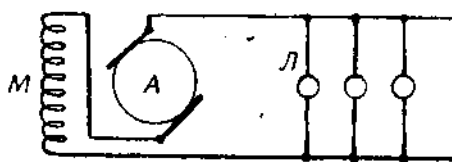


Рис. 61.

цепь якоря последовательно со внешней цепью, питаемой якорем (рис. 61).

в) Возбуждение в отвлении (шунтовое), при котором электромагнит включен параллельно внешней цепи (рис. 62).

г) Возбуждение смешанное (компоунд), составленное из (б) и (в): электромагнит имеет две обмотки, из которых одна включена последовательно, вторая параллельно (рис. 63). Способы (б), (в) и (г), требующие, чтобы элек-

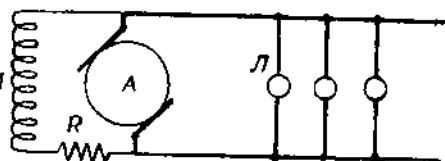


Рис. 62.

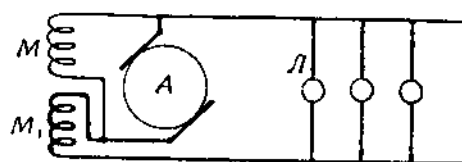


Рис. 63.

не дает тока, уже образовывали поле, без которого не может индуцироваться электродвижущая сила, основанная на том, что в их сердечниках всегда имеется остаточный магнетизм от предшествовавшего действия машины.

3. Выражение эдс. Мы рассмотрим якорь так называемого кольцевого типа; в этом случае железное кольцо якоря обматыва-

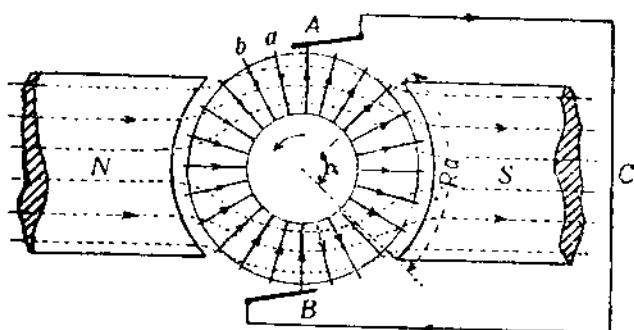


Рис. 61.

ется витками, из которых каждый охватывает кольцо по его толщине (рис. 64). При вращении якоря витки его обмотки пересекают поток, находящийся между полюсами, вследствие чего в каждом из них появляется электродвижущая сила. Из всех четырех сторон каждого витка только одна, расположенная вдоль внешней поверхности якоря, пересекает магнитный поток; две другие — видимая на чер-

теже и ей противоположная движутся вдоль линий потока, а четвертая движется внутри железного кольца, куда силовые линии проникают лишь в ничтожном числе. По формуле (23) мы можем определить эдс, индуцируемую в действующей части витка.

Пусть якорь делает u оборотов в секунду; следовательно, за $\frac{1}{u}$ сек. каждая точка его внешней поверхности и каждый виток своею внешнею стороною опишет путь $2\pi R$, если R — внешний радиус якоря; полный путь мимо каждого магнитного полюса каждый виток опишет за время t во столько раз меньше, чем $\frac{1}{u}$, во сколько $R\alpha$ меньше $2\pi R$, где $R\alpha$ обозначает дугу центрального угла, охватываемого полюсною поверхностью (рис. 64);

$$t: \frac{1}{u} = R\alpha: 2\pi R; t = \frac{\alpha}{2\pi u}.$$

В это время действующая сторона витка пересечет весь магнитный поток Φ , исходящий из полюса; следовательно, в ней индуцируется эдс (форм. 23).¹⁾

$$e = \frac{\Phi}{t} = \frac{\Phi}{\alpha} 2\pi u.$$

Во всех витках, находящихся в данный момент перед одной, например, правой полюсною оконечностью, и, следовательно, пересекающих магнитное поле, индуцируется такая же e по величине и направлению; а число таких витков во столько раз меньше, чем полное число витков n на якоре, во сколько $R\alpha$ меньше $2\pi R$, т.е. таких витков $\frac{n\alpha}{2\pi}$.

Эдс всех этих витков, складываясь, действуют в обмотке якоря и, следовательно, полная эдс в половине якоря

$$E = e \frac{n\alpha}{2\pi} = \Phi n u.$$

Эта эдс выражена в CGS-ной системе, так как Φ всегда определяется в этой системе измерений.

Если выразить E в вольтах, мы получим

$$E = \Phi \cdot n \cdot u \cdot 10^{-8} \text{ V.} \quad (24)$$

¹⁾ Предполагается, что в воздушном промежутке линии потока направлены по равномерно распределенным радиусам из точки O . Для реального распределения линий магнитного потока конечный вывод получается такой же (форм. 24).

В левой половине якоря, как симметричной с правой индуктируется такая же по величине эдс E ; но направление ее обратное, так как в этой половине витки обмотки движутся через то же самое поле, но не вверх, как в правой половине, а вниз. Таким образом, в якоре получаются две равные электродвижущие силы, производящие токи взаимно противоположные, и потому, если оставить якорь так, как изображено на рис. 57, его вращение в поле не вызовет в нем тока. Если же (рис. 64) в точках A и B установить проводники, нажимающие на обмотку ¹⁾ якоря, так называемые щетки, и соединить их со внешней цепью, то с обеих половин якоря токи будут стекать через щетку A во внешнюю цепь, а через B они вернутся в якорь. Получается замкнутый ток, при чем две половины вращающегося якоря играют роль двух, параллельно соединенных элементов (рис. 7). Каждая половина обмотки якоря дает в цепи полную эдс равную E .

Эта эдс распределится на два падения потенциала, E_1 во внешней цепи, от щетки A (рис. 64) через C до щетки B , и E_2 - во внутренней, т. е. в обмотке якоря, при чем формула (13) вполне, конечно, применима к этому случаю:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Кроме кольцевого типа якоря существует еще так называемый барабанный; он представляет собою цилиндрический сердечник с обмоткою только на внешней поверхности. Теория его тождественна с теорией кольцевого якоря.

Направление тока в якоре определяется по правилу Ленца: оно должно быть таково, чтобы создавалась электромагнитная сила, противодействующая вращению якоря; механическая энергия, прикладываемая к валу якоря, должна побороть это противодействие.

Сообразно этому дано направление токов на рис. 64.

4. Коллектор; сдвиг щеток. Такое расположение щеток, какое показано на рис. 64, неудобно, особенно в малых машинах, так как не позволяет применить изолированный проводник для обмотки якоря; вследствие этого витки не могут быть расположены на близких расстояниях, и число их n не может быть столь велико, как то позволяют размеры якоря; от этого теряется на электродвижущей

¹⁾ В этом случае обмотка должна быть лишена изолировки с наружной своей стороны.

силе [форм. (24)]. Грамм придумал способ привести в непрерывное прикосновение вращающийся якорь с неподвижными щетками при изолированной обмотке якоря. Для этой цели на ось якоря насаживается цилиндр (рис. 65), „коллектор“ из изолирующего материала

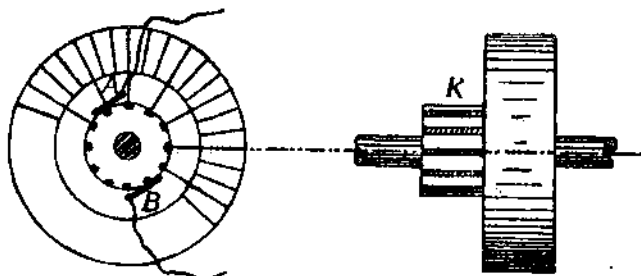


Рис. 65.

с медными полосками вдоль образующих, так называемыми „коллекторными пластинками“. К этим пластинкам припаяны проводники, ведущие от ближайших витков на якоре; витки, находящиеся между двумя такими проводниками, составляют „секцию“ якорной обмотки. Если в двух точках А и В коллектора установить нажимающие щетки якоря, то они будут снимать ток с якоря также, как если бы они непосредственно касались соответственных витков.

В каждый данный момент работают те пластинки коллектора, которые находятся под щетками; остальные, как не замкнутые проводники, остаются без тока. Контактные поверхности щеток должны

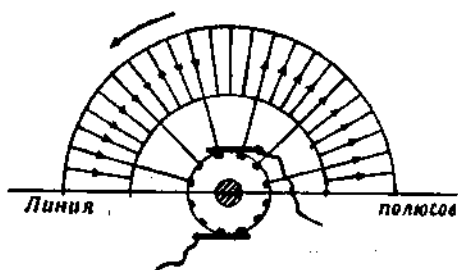


Рис. 66.

быть столь велики, чтобы в тот момент, когда одна пластинка коллектора оставляет щетку, соседняя с ней уже подходила под щетку; иначе, происходило бы замыкание тока во внешней цепи. Это обстоятельство служит одною из причин¹⁾ искр у коллектора, портящих его пластинки, изоляционный материал и щетки. Эти искры появляются вследствие того, что в момент прикосновения двух соседних пластинок к щетке секция якоря (рис. 66), находящаяся

1) Других причин, между которыми особенно важна так наз. реакция якоря, мы не рассматриваем.

между ними, „коммутируемая“, является замкнутою через щетку сама на себя; ток с обеих половин якоря стекает в щетку по двум соединительным с коллектором проводам, не заходя в коммутируемую секцию; выше было указано, что, если катушка вдруг лишается внешнего эдс, то в ней действует эдс самоиндукции, которая может быть очень велика, если катушка имеет много витков и снабжена железным сердечником (стр. 127); эта эдс и производит искру, как бы продолжающую тот ток, который только-что шел по секции. Величина искры в большой мере зависит еще и от тока, даваемого машиною в данный момент.

Практикою был найден способ ослабить искрообразование; для этого нужно установить щетки не в тех точках, которые лежат на диаметре перпендикулярном к линии полюсов, но несколько сдвинуть их по направлению вращения якоря (рис. 67). Это правило объясняется следующим образом: если щетки

достаточно сдвинуты, то коммутируемая секция находится уже не в той половине якоря, ток которой она только-что несла; вследствие пересечения ею, нового магнитного потока 1)

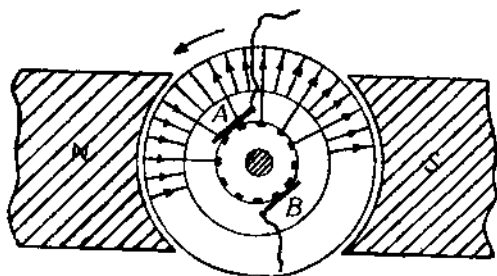


Рис. 67.

в ней уже индуцируется обратная эдс (соответственная другой половине якоря), которая ослабляет или даже уничтожает эдс самоиндукции, потому что эта последняя сохраняет направление тока оставленной половины. В условиях рис. 67 щетка (А) должна быть сдвинута влево.

5. Регулировка динамомашин. Мы видели (рис. 18), что в электрической сети постоянно происходят колебания нагрузки, т.-е. сопротивление внешней цепи то увеличивается, то уменьшается.

Если сопротивление внешней цепи, на которую работает динамо, уменьшится, то величина тока в цепи (и нагрузка) увеличится, а напряжение E_1 у ее зажимов упадет.

1) Точнее сказать: того же потока, но пересекаемого секцией в обратном прежнему направлении; на рис. 68 — сверху вниз.

Действительно, полная эдс $E = E_1 - E_2$ динамо от внешнего сопротивления не зависит, как показывает формула (24); но

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_1}{r_2};$$

следовательно, с увеличением нагрузки, с уменьшением r_1 (при постоянном r_2) E_2 станет уменьшаться, E_1 увеличится, при $E = \text{пост.}$

Между тем, в большинстве случаев применения динамо от нее требуется не только доставлять ток во внешнюю цепь, но и поддерживать при этом постоянную разность потенциалов E_1 во внешней цепи.

Это явление можно понимать и с другой точки зрения: увеличение нагрузки сети непременно сопровождается увеличением тока, так как внешнее сопротивление падает. Но ток увеличивается меньше, чем требуется для увеличившейся нагрузки. Если, например, включено вдвое больше одинаковых параллельных приемников, то для них нужен двойной ток; но при постоянном E этого не случится, так как вдвое уменьшится только сопротивление приемников, а сопротивление генератора останется прежним. Иными словами, требуется больше вольт на генератор, так как с увеличением i в генераторе увеличится $ir = E_2$, и на внешнюю цепь останется меньшее напряжение $E_1 = E - E_2$.

Прибавим к этому, что более нагруженная магистраль при своем постоянном сопротивлении берет на себя больше вольт; следовательно, если бы даже напряжение у щеток E_1 не уменьшилось, из него больше вычиталось бы на магистрали, чем было при малой нагрузке, и меньше осталось бы на приемники. Падение вольт в магистралях (стр. 60) является второю причиною, усугубляющею падение напряжения у зажимов приемников с увеличением нагрузки.

Все происходит обратно при уменьшении нагрузки; и если при большем числе приемников их вольты были как раз достаточны, то с уменьшением их числа напряжение у зажимов может оказаться столь высоким, что появляется опасность повреждения приемных приборов.

Таким образом необходимость поддержания E на должной высоте является существенною. Способы, которыми это достигается, называются регулировкой динамомашин.

а) В случае отдельного возбуждения (рис. 60) регулировка упавшего напряжения E_1 производится увеличением тока в цепи электромагнита (уменьшается сопротивление реостата R); вследствие

этого увеличивается Φ по формуле (19') и возрастает по формуле (24) полная эдс $E = E_1 + E_2$, а значит, возрастает и E_1 . Реостат R выключают в такой мере, чтобы E_1 поднялось до должной величины. Если напряжение E_1 не упало, а, наоборот, поднялось выше нормального — вследствие уменьшения нагрузки, реостат R увеличивают, E падает, уменьшается и E_1 .

Таким образом, E_1 доводится до должной величины помощью изменения E .

б) Последовательное возбуждение (рис. 61). В этом случае надо обратить внимание на то, что включение нового числа параллельно введенных ламп вызывает вместе с уменьшением E_1 увеличение тока в обмотке электромагнита, так как ток всей цепи увеличивается, а электромагнит включен непосредственно в эту цепь. Увеличение тока возбуждения уже и влечет за собою увеличение Φ , а следовательно, и эдс E , а значит и E_1 .

Обратное произойдет при уменьшении числа ламп во внешней цепи. Отсюда следует, что такая машина (правда, в узких пределах колебания i) регулирует сама себя.

в) Шунтовое возбуждение (рис. 62). В этом случае уменьшение внешнего сопротивления также ведет к уменьшению E_1 , потому что приведенное сопротивление внешней цепи и обмотки электромагнита уменьшается, а сопротивление якоря остается неизменным.

Так как в этом случае электромагниты находятся под напряжением E_1 , то с уменьшением его падает ток в электромагнитах, поле ослабевает, и E_1 вместе с E еще уменьшается. Мы видим, что машина с возбуждением в ответвлении отнюдь не регулирует сама себя. Однако, простым способом регулировки такой машины является реостат R , включенный в цепь возбуждения (рис. 62). Уменьшение в достаточной мере сопротивления этого реостата уменьшает сопротивление шунта, направляет в него достаточный ток, вследствие чего увеличивается E ; с нею и E_1 возрастает до необходимой величины.

При уменьшении сопротивления внешней цепи, реостат R должен быть в достаточной мере увеличен, чем уменьшается E , а с нею падает и E_1 .

г) Возбуждение смешанное (рис. 63).

В этом случае уменьшение сопротивления внешней цепи уменьшает ток в цепи M (случай В), но за то увеличивает его в цепи M_1 (случай Б); можно так подобрать обмотки M и M_1 , что машина в значительных пределах колебания нагрузки во внешней цепи регулирует сама себя.

6. Полезное действие динамомашин. Полезное действие динамомашин рассматривается с трех точек зрения.

1. *Промышленную отдачу* называется отношение „полезной“ электрической энергии, получаемой от машины во внешней цепи, к механической энергии, потребляемой на валу якоря машины:

$$a = \frac{\text{полезная электр. энергия}}{\text{механ. энергия}};$$

обыкновенно энергия рассчитывается на 1 сек. (мощность).

Для определения промышленной отдачи нужно знать механическую

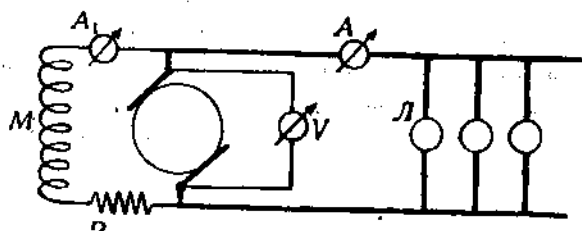


Рис. 68.

энергию, потребляемую на валу динамо в 1 сек., и ватты, получаемые от динамомашин во внешней цепи. Для определения этих ваттов во внешнюю цепь включается амперметр A (рис. 68), а параллельно с ней, между зажимами у щеток динамо, вольтметр V . Оба прибора могут быть соединены в один — ваттметр.

2. *Электрической отдачей* динамо называется:

$$b = \frac{\text{полезная электр. энергия}}{\text{полная электр. энергия}}$$

Под полную электрическую энергию разумеется вся энергия, вырабатываемая динамомашинной; она поглощается не только во внешней цепи, но еще и во внутренней, в самой машине, т.е. тратится на нагревание проводов в ее якоре и электромагнитах; таким образом она складывается из трех частей.

Пример: пусть шунтовая машина дает во внешней цепи ток i (амперметр A на рис. 68) при напряжении E_1 (вольтметр V); пусть при этом амперметр A_1 в шунте показывает i_m ; шунтовая цепь находится под тем же напряжением E_1 , что и внешняя. Ток в якоре i_a не может быть непосредственно измерен, но он равен $i + i_m$. Полная электрическая энергия в сек. $= E_1 i + E_1 i_m + E_2 i_a$; не имея возможности измерить E_2 , выразим

электрическую мощность в якоре по формуле (10); если сопротивление его обмотки $= r_a$, то $E_a i_a = i_a^2 r_a$, где $E_a = E_2$. Итак, полная электрическая энергия в 1 сек. равна $E_1 (i + i_m) + i_a^2 r_a =$
 $= E_1 i_a + i_a^2 r_a$;

$$b = \frac{E_1 i}{E_1 i_a + i_a^2 r_a}$$

Первый член знаменателя заключает в себе две части полной электрической энергии, поглощаемую внешней цепью и поглощаемую обмоткой электромагнита.

3. Коэффициентом преобразования динамо называется

$$c = \frac{\text{полная электр. энергия}}{\text{механ. энергия}}$$

Очевидно, что $a = b \cdot c$.

Механическая энергия, сообщаемая валу якоря динамомашин, не вся переходит в полную электрическую энергию; некоторую частью она идет на трение вала в подшипниках, на образование токов Фуко в сердечнике якоря (для уменьшения их сердечник делается из отдельных полос или проволок), на гистерезис (см. гл. XI § 6) в железе сердечника.

7. **Электродвигатель постоянного тока.** Действие динамомашин обратимо; когда она работает, как генератор, на вращение ее якоря затрачивается механическая энергия. Но возможно, посылая в ее якорь и магниты ток, т. е. электрическую энергию от посто-

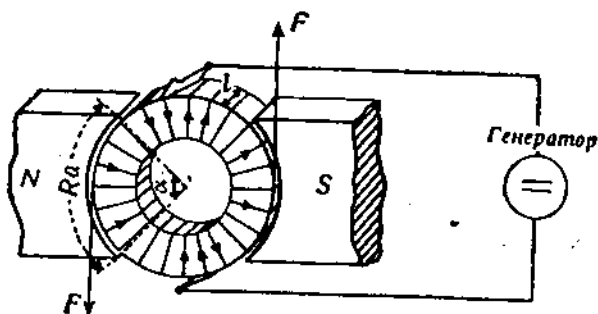


Рис. 69.

ронного источника (рис. 69), получить от якоря — механическую. При этом витки обмотки якоря будут находиться под действием электромагнитных сил: по ним протекает ток и они находятся в постороннем магнитном поле. Эти силы получаются из формулы (20).

Если в якорь посылается ток i , то через каждую его половину (и каждый виток) проходит ток $i/2$; к каждому витку, находящемуся в магнитном поле, приложена сила $l \cdot i/2 \cdot H$, где l означает длину действующей, обращенной к полюсу, части витка и H означает напряжение магнитного поля в междуполосном пространстве.

Таких витков с одной стороны якоря $\frac{n R \alpha}{2 \pi R}$, если n — число витков на якоре; следовательно, полная сила, действующая на половину якоря,

$$F = \frac{i}{2} \cdot l \cdot H \cdot \frac{n R \alpha}{2 \pi R}.$$

Но $l R \alpha =$ поверхности якоря против полюсного наконечника, чрез которую выходит поток, а, следовательно, $H l R \alpha =$ полному потоку Φ ; итак

$$F = \frac{i}{2} \cdot \frac{\Phi n}{2 \pi R} \text{ дин},$$

при чем i дано в CGS единицах, как и все остальные величины.

На другую сторону якоря действует такая же сила F , но в обратную сторону; обе развивают пару сил с моментом

$$M = F \cdot 2R,$$

т.-е.

$$M = \frac{\Phi n i}{2 \pi}.$$

Если механическая нагрузка двигателя требует меньшую пару сил, то двигатель придет во вращение, т.-е., будет совершать механическую работу.

8. Обратная эдс. Когда якорь двигателя вращается, делая например, n оборотов в сек., то в нем индуцируется эдс обратного направления — обратного в сравнении с той, которая производит в нем ток, причиняющий движение, так как по правилу Ленца индуцируемый ток должен мешать движению. Эту обратную эдс дает формула (24):

$$e = \Phi \cdot n \cdot u \cdot 10^{-8}.$$

Необходимо применить формулу (24), так как в якоре, движется ли он под действием механической силы или силы электромагнитной, генерируется эдс по одному и тому же закону (см. стр. 120).

Вольты генератора (рис. 69), питающего двигатель, должны быть больше e , например, $E = e + E_0$. Мощность генератора распадается на две:

$$E i = e i + E_0 i;$$

первое слагаемое, в котором заключаются вольты, побеждающие обратную эдс двигателя, выражает мощность, идущую на механическую работу; второе — измеряет мощность, идущую на все остальное, т.-е. на нагревание обмоток двигателя, сопротивление которых, следовательно, равно $r = E_0/i$, по уравнению $E_0 i = i^2 r$.

Так происходит превращение электрической энергии в механическую.

9. Включение электродвигателя. Скорость вращения. Большие электродвигатели включаются обыкновенно параллельно между магистралями сети, питаемыми генератором. Весьма часто между теми же магистралями включаются и лампы накаливания; в этом случае двигатели устраиваются для включения под столькими же вольтами, как и лампы (обыкн. около 110 V). Более мощные электродвигатели, включаемые в трамвайную сеть, строятся на большее число вольт (500 — 600 V). Ток i , идущий чрез двигатель, зависит в каждый момент от эдс E сети, обратной эдс e якоря и сопротивления двигателя r по формуле:

$$i = \frac{E - e}{r} = \frac{E - \Phi n i}{r} \cdot 10^{-8}$$

Применение электромоторов весьма разнообразно; отметим лишь то обстоятельство, что некоторые из применений требуют от двигателя возможно полного сохранения скорости вращения при быстрой перемене нагрузки.

Положим, что механическая нагрузка вдруг значительно уменьшилась, например, резец токарного станка, приводимого в движение электродвигателем, сломался; скорость вращения якоря n увеличится; вследствие этого обратная эдс e возрастет, и ток i чрез якорь уменьшится, как это следует из вышеприведенной формулы.

Что скорость вращения двигателя увеличивается с уменьшением нагрузки — это представляет собой общее свойство всех двигателей; но в электромоторе выступает при этом та замечательная особенность, что, если его нагрузка уменьшилась, он не выпускает уже в себя прежней энергии, но меньшую; он, так сказать, автоматически регулирует приход энергии сообразно работе, спрашиваемой от него, т.-е. сообразно своей нагрузке. Действительно, если увеличение скорости электродвигателя уменьшает ток в нем, то при, условии постоянства вольт в цепи, это и обозначает, что уменьшаются ватты Ei , идущие на мотор.

На ряду с этим в электродвигателе имеются причины, мешающие чрезмерному возрастанию скорости. Чтобы показать это, выразим скорость вращения u чрез i и Φ из вышеприведенной формулы:

$$u = \frac{E - ri}{\Phi n 10^{-8}}.$$

Рассмотрим, как изменяется u с увеличением нагрузки и уменьшением тока в двигателях с различными способами возбуждения.

Если возбуждение двигателя последовательное, т.-е. его электромагниты и якорь включены последовательно между магистральями сети, как изображено на рис. 70, то с уменьшением i уменьшается и Φ , так как i якоря обходит и обмотку электромагнита. В этом случае u весьма возрастает с уменьшением i , так как числитель в выражении для u увеличивается, а знаменатель уменьшается.

Если возбуждение двигателя шунтовое (рис. 71), то магниты его питаются током прямо от сети с напряжением E , не зависящим от обратной электродвижущей силы якоря; вследствие этого увеличение u произойдет только от уменьшения i .

Наконец, предположим, что возбуждение электродвигателя смешанное, т.-е. его электромагнит имеет две обмотки; одна, включенная по способу рис. 70, другая — по схеме рис. 71; эти обмотки

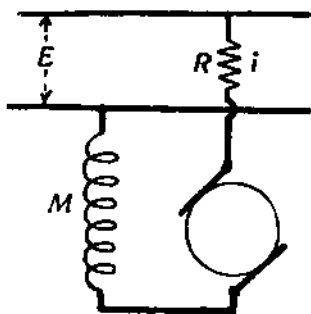


Рис. 70.

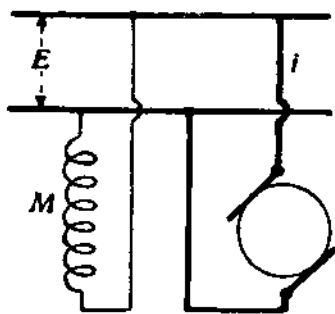


Рис. 71.

наматываются таким образом, что производят в сердечнике противоположные потоки, при чем поток, производимый шунтовой обмоткой, преобладает; таким образом, поток Φ , в котором вращается якорь в этих двигателях, разлагается на два:

$$\Phi = \Phi_{ш} - \Phi_{п},$$

если разуметь под $\Phi_{ш}$ и $\Phi_{п}$ потоки, образуемые соответств. шунтовой и последовательно обмотками. При уменьшении i в якорь

Φ_n уменьшается, а следовательно $\Phi = \Phi_{ш} - \Phi_n$ увеличивается: вследствие этого знаменатель выражения для η увеличивается. Обмотки возбуждения могут быть так рассчитаны, чтобы увеличение числителя было почти уравновешено этим увеличением знаменателя, и тогда в больших пределах изменения тока i , скорость вращения двигателя останется приблизительно постоянной. Отсюда следует, что, если имеет значение сохранение скорости вращения мотора, наилучшим способом возбуждения оказывается возбуждение смешанное.

10. Определение коэффициента полезного действия электродвигателя. — Коэффициентом полезного действия электродвигателя называется отношение механической мощности, даваемой им, к электрической, которую он потребляет. Если первую назовем через P , а вторую определим, как Ei , то кпд

$$\eta = \frac{P}{Ei}.$$

Обыкновенно последовательно с двигателем включается реостат (R на рис. 70), называемый пусковым реостатом. После замыкания цепи двигателя реостат мало-по-малу выключается (R уменьшается); он приносит ту пользу, что в первые моменты, когда двигатель не достиг еще своей нормальной скорости и не развивает своей обратной эдс в полной мере, сопротивление реостата не допускает току в обмотке двигателя чрезмерно увеличиться. Без реостата, по причине малого сопротивления обмотки якоря, пошел бы слишком сильный ток, могущий сжечь обмотку. Когда этот реостат выключен, ток в двигателе равен:

$$i = \frac{E - e}{r},$$

где r сопротивление двигателя. Из этого уравнения, умножив его на ir , получаем:

$$Ei = i^2 r + ei.$$

Таким образом, как мы видели выше, электрическая мощность тока Ei тратится и на джоулево нагревание $i^2 r$, и на ei — работу двигателя в 1 сек.; но не вся механическая мощность двигателя есть мощность P , даваемая им на внешних предметах; часть её b уходит на трение оси о подшипники, на гистерезис, токи Фуко и паразитные токи. Следовательно,

$$Ei = i^2 r + b + P.$$

Величину b узнают, пустив мотор в холостую при том же числе оборотов в *сек.*, при каком он совершал свою работу; ¹⁾ вращаясь в холостую, двигатель тратит свою механическую мощность только на внутренние потери и джоулево тепло; если вращение в холостую происходит с той же скоростью, что и при нагрузке, то и все внутренние потери (совершающиеся при каждом обороте якоря) за каждую *сек.* будут такими же, как и при нагрузке. Для холостой работы получаем уравнение.

$$E_1 i_1 = i_1^2 r + b;$$

отсюда узнается b .

Величина r может быть получена очень просто: двигатель под током затормаживают; так как неподвижный двигатель представляет собою просто проводник, то для этого случая наше уравнение обращается в

$$E_2 i_2 = i_2^2 r;$$

отсюда узнают r . Зная r и b , получаем P из уравнения

$$P = Ei - i^2 r - b.$$

По величине P и Ei определяем искомое α .

Таким образом, для определения α необходимо включить вольтметр у зажимов мотора, амперметр в цепи его, и сделать на этих приборах по три отсчета: при заторможенном моторе, при его ходе в холостую и при нагрузке.

Коэффициент полезного действия электродвигателя значительно изменяется с величиною его нагрузки.

11. Примеры. 1. Определить промышленную отдачу динамомашины, дающей во внешней цепи $E_1 = 100 \text{ V}$ при $i = 60 \text{ A}$, потребляющей при этом на своем валу $10,25 \text{ л. с.}$

$$\alpha = \frac{100 \cdot 60}{10,25 \cdot 736} = 79,5\%.$$

2. Определить полезное действие двигателя, от которого получается $0,5 \text{ л. с.}$, когда в него идет ток 9 A под 60 V .

$$\alpha = \frac{0,5 \cdot 736}{9 \cdot 60} = 68,1\%.$$

3. Электродвигатель предназначается для подъема 150 куб. м воды в течение 4 часов на высоту 20 м ; он включен в 600-воль-

¹⁾ Это достигается соответственным увеличением R , т. е. уменьшением E у зажимов якоря.

товую сеть и имеет полезное действие в 70%. Какой ток должен быть пущен в него?

Мощность двигателя должна быть:

$$\frac{150 \cdot 10^3 \cdot 20}{4 \cdot 3600} \text{ кг/м в сек.} = \frac{3 \cdot 10^6}{4 \cdot 3600 \cdot 75} \text{ л. с.} = 2048 \text{ ватт.}$$

$$0,7 \cdot E \cdot i = 2048, \text{ или } 0,7 \cdot 600 \cdot i = 2048,$$

откуда $i = 4,86 \text{ А}$.

4. Какую скорость вращения следует придать якорю динамомашинны, имеющей (ср. рис. 69) $n = 100$, $R_a = 15 \text{ см}$, $l = 10 \text{ см}$, $H = 6000$, чтобы получить между ее щетками 10 V?

$10 \cdot 10^8 = 6000 \cdot 15 \cdot 10 \cdot 100 \cdot n$; $n = 11$ обор. в 1 сек., или 660 обор. в минуту.

ГЛАВА VIII.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ. ЭЛЕМЕНТЫ.

1. **Электролит.** Некоторые проводники, при прохождении через них электрического тока, разлагаются на две электрически противоположные части. Такие проводники называются проводниками второго рода или электролитами. Само явление называется электролизом. В большинстве случаев электролиты суть жидкости, но существуют примеры разложения током твердых тел и газов.

Сосуд, в котором происходит разложение, называется вольтметром, а при больших, технических размерах — электролитической ванной. Жидкость, находящаяся в нем, вводится в цепь тока помощью погруженных в нее электродов из одинакового металла, например, платиновых или медных.

Одним из важнейших электролитов в природе является вода, содержащая в себе в растворенном виде какую-либо соль или кислоту.

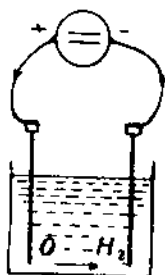


Рис. 72.

В общей электротехнике очень часто пользуются раствором серной кислоты в воде (элементы, аккумуляторы). Ток, проходящий через такой раствор, как бы разлагает ¹⁾ воду, при чем водород выделяется на том электроде вольтметра, который соединен с отрицательным зажимом генератора (рис. 72), называемым катодом, а кислород на втором электроде, называемым анодом. Замечено, что в большинстве случаев та часть разлагаемого электролита, которая носит более металлический характер, отлагается на катоде, т.е. движется в вольтметре по направлению тока.

2. **Обратная эдс вольтметра.** Две части разложившегося электролита, выделившиеся на электродах вольтметра, если они не

¹⁾ На самом деле это разложение является вторичным процессом, следующим за разложением серной кислоты.

удаляются механически, или не исчезают в побочных реакциях с жидкостью электролита, производят явление *поляризации*. Явление заключается в том, что вольтметр сам становится генератором, производит в цепи эдс, обратную и всегда несколько меньшую в сравнении с эдс, дающей ток для разложения. Обратная эдс поляризации возрастает в начале процесса, достигает некоторой предельной величины, и затем является уже постоянным вычитаемым из эдс генератора, уменьшая этим ток через вольтметр. Если поляризованный вольтметр отделить от питающей цепи и замкнуть отдельным проводником, его эдс проявится, давая ток обратный тому, который шел по вольтметру при разложении; разделившиеся части электролита пойдут теперь обратно навстречу друг другу, и сложное тело электролита мало-по-малу восстановится; тогда эдс вольтметра исчезнет.

Для цепи вольтметра мы должны написать (R — сопротивление цепи, включая и вольтметр, c — эдс поляризации):

$$i = \frac{E - c}{R}.$$

Было объяснено, что всякий электродвигатель, когда он вращается, т.е. совершает механическую работу,¹⁾ возбуждает обратную эдс; теперь оказывается, что то же самое происходит и в вольтметре. Эта *обратная эдс* и представляет собою *общий признак* приемника электрической энергии, обращающего ее не в тепло, но в какую-либо другую форму.²⁾

Вследствие этой обратной эдс величина тока через вольтметр меньше, чем если бы генератор, создающий E , работал только на сопротивление R , не производящее обратной эдс.

3. Практические применения электролиза весьма многочисленны. Сюда относятся выделение металлов из руды, гальванопластика, золочение, серебрение, никкелирование и т. д. Предмет, который желают покрыть, например, серебром, погружается в электролитическую ванну, наполненную раствором серебряной соли; через ванну пропускают ток, по направлению к покрываемому предмету; тогда на нем будет отлагаться металлическое серебро.

¹⁾ Если он вращается, но не нагружен, в холостую, его работа идет только на внутреннее трение и другие потери, как мы упоминали в пред. главе § 10.

²⁾ В целях однообразия, в главе XI мы будем говорить и о тепловом приемнике, как дающем обратную эдс.

4. Законы Фарадея. Фарадей (1833 г.) дал следующие два закона электролиза:

I. Весовое количество P какого-нибудь вещества, отложившееся в вольтамetre, пропорционально количеству электричества, протекавшего через цепь, т.-е.

$$P = a \cdot Q = a \cdot i \cdot t.$$

Величина a для каждого тела имеет характерное значение; Фарадей назвал ее *электрохимическим эквивалентом*.

Закон (I) позволяет помощью отложения на электроде вещества, у которого известно a , измерением величин P и t узнать величину тока i по формуле:

$$i = \frac{P}{at}.$$

Прделаны чрезвычайно точные опытные определения a для серебра при токе, измеренном с чрезвычайной точностью и абсолютно (стр. 98). Оказалось, что 1 ампер в одну секунду, т.-е. кулон, выделяет 0,001118 г серебра (ампер в час выделяет около 4 г Ag).

II. Электрохимические эквиваленты различных тел относятся так, как химические эквиваленты.

По этому закону, зная электрохимический эквивалент серебра и отношения химических эквивалентов, например,

$$\text{Ag} : \text{Cu} : \text{Zn} = 107,88 : 31,78 : 32,68$$

можно получить электрохимические эквиваленты для Cu и Zn (прибл.)

$$a_{\text{Cu}} = 0,00033; a_{\text{Zn}} = 0,00034.$$

Очевидна выгода пользования серебряным вольтаметром в сравнении с медным, так как электрохимический эквивалент Ag почти в $3\frac{1}{2}$ раза больше, чем a для Cu. Если продуктом электролиза являются газы, то количество выделившегося вещества перечисляется на объем при 0° и 760 мм давления (нормальные условия). Для этого, например, в газовом вольтамetre (рис. 4) необходимо отмерять разность высот жидкости h .

При разложении воды 1 ампер в секунду выделяет 0,116 см³ водорода (0° и 760 мм).

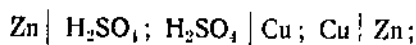
5. Гальванический элемент. Как было уже упомянуто в первой главе, существуют генераторы, в которых химическая энергия превращается в электрическую. Они называются элементами. Понятно, что генерировать электрическую энергию не может такая реакция, которая сама поглощает энергию (эндотермическая); причиной

действия элемента служит какая-либо экзотермическая реакция, выделяющая энергию. Если бы она происходила не в электрической цепи, выделялось бы тепло; происходя же в элементе, замкнутом на проводник, по какой-то удивительной внутренней причине та же реакция, уже не выделяя тепла, сопровождается выделением электрической энергии в виде тока.

Элемент должен состоять из химически разнородных тел, стремящихся к соединению. Так, например, упомянутый выше элемент Вольты состоит из подкисленной воды, цинка и меди; стремление Zn заместить H_2 в серной кислоте с потерей соответственного количества энергии и является основною причиною действия этого элемента.

6. Контактная разность потенциалов. Со времени Вольты разность потенциалов всякого элемента приписывают местам прикосновения разнородных тел, составляющих этот элемент; на поверхностях соприкосновения и предполагается истинное место электрической генерации.

Так, например, в элементе Вольты (рис. 73-а), замкнутом медным проводником, мы имеем, собственно, три генератора, три соприкосновения:



последнее указанное прикосновение есть место контакта медной проволоки, замыкающей элемент, с цинковым электродом. Все места прикосновения производят эдс, действующие в цепи не в одну сторону; некоторые могут взаимно противодействовать; эдс элемента есть их алгебраическая сумма.

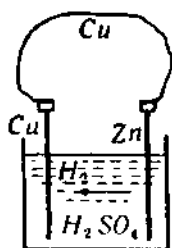


Рис. 73-а.

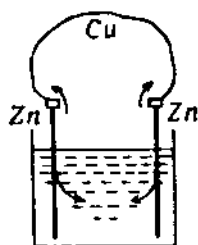


Рис. 73-б.

Из понятия о контактной разности потенциалов следует, что невозможно составить элемент с двумя одинаковыми металлическими электродами, так, например, из подкисленной воды и двух цинковых пластинок (рис. 73-б), опущенных в эту жидкость и соединенных внешне цепью из медной проволоки. Один цинк электродвижущую силу своего контакта будет двигать (+) электричество чрез жидкость от себя; навстречу ему с тою же электродвижущую силу другой цинк будет двигать электричество тоже от себя; также противоположно будут действовать и два контакта Zn/Cu, и ток не пойдет.

Вольта ввел понятие о контактной эдс из своих опытов над электризацией, происходящей при прикосновении разнородных метал-

лов; такая пара металлов оказывается наэлектризованною, при чем между металлами, составляющими такую пару, устанавливается некоторая определенная разность потенциалов; эдс контакта не позволяет этой разности потенциалов выравниваться током через контакт. Но из каких бы металлов мы ни составили замкнутой цепи, тока в ней получиться не может: все эдс контактов всегда взаимно уничтожаются (закон Вольты). Необходимо, как открыл тот же Вольт, сделать жидкость одним из звеньев этой цепи контактов, чтобы пошел ток, т.-е. чтобы алгебраическая сумма эдс не равнялась нулю, иными словами, чтобы получился генератор.

Такова история элемента Вольты.

7. Поляризация элемента. Когда элемент дает ток, то этот ток идет, конечно, и чрез него самого, идет чрез его жидкость, представляющую собой электролит, и разлагает ее.

Поэтому, например, в элементе Вольты (рис. 73-а) ток его, разлагая H_2SO_4 , отлагает водород на меди, а остаток SO_4 соединяется с Zn , образуя цинковый купорос, тут же растворяющийся. *Выделение водорода на положительном полюсе представляет собою поляризацию элемента*; появляется эдс поляризации, против эдс элемента, и ток от него при том же сопротивлении цепи все уменьшается; это выражают в словах: элемент поляризуется.

Поляризация элемента представляет собою его недостаток.

8. Элементы без поляризации. Ослабить поляризацию, деполяризовать элемент можно, например, механически, удаляя с меди водород, выделяющийся на ней.

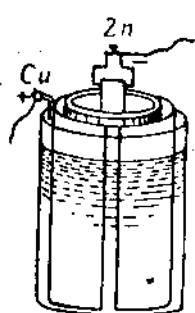


Рис. 74-а.

Сми предложил для этой цели заменить Cu шероховатой платиной, с которой водород сходит, скопляясь пузырьками.

Но особенно важен способ деполяризации, осуществленный Даниэлем (1836 г.) в его элементе с двумя жидкостями; элемент Даниэля (рис. 74-а) состоит из стеклянного цилиндрического сосуда, наполненного раствором медного купороса $CuSO_4$, в который погружен медный лист, имеющий форму цилиндра; внутри этого сосуда вставляется второй из пористой глины, наполненный раствором H_2SO_4 , в который погружается стержень Zn . В этом элементе также происходит образование $ZnSO_4$, но выделяющийся при этом H_2 , пройдя сквозь стенки пористого сосуда, и поступив в пространство

между стенками двух сосудов, не отлагается на Cu , но поступает в CuSO_4 ; отсюда он вытесняет Cu , образуя H_2SO_4 . Выделенная медь отлагается на медном электроде. Таким образом, CuSO_4 служит деполаризатором в элементе Даниэля. Устройство элемента может быть и таково, что H_2SO_4 с листом Zn находится во внешнем сосуде, медный же купорос со стержнем из Cu — в пористом.

Во время действия элемента Zn расходуется, уменьшаясь на 0,0003389 г при прохождении каждого кулона (около 1 г в час при $i = 1 \text{ A}$), тогда как медь за это время увеличится в весе на 0,0003286 г. Эдс элемента Даниэля колеблется между 1,07 V и 1,14 V; она почти не зависит от температуры, и значительно понижается по мере образования H_2SO_4 вместо раствора медного купороса (около Cu), и ZnSO_4 вместо H_2SO_4 (около Zn). Если около Cu находится уже слишком слабый раствор CuSO_4 или просто H_2SO_4 , то начинается разложение воды (как в элементе Вольты) и выделение H_2 на Cu ; начинается поляризация.

Для получения элемента Даниэля с постоянной E нужно, следовательно, в отделении меди иметь запас кристаллов медного купороса.

Медный купорос со временем действия проникает чрез пористые стенки, и тогда Cu отлагается на Zn , делая его как бы похожим на Cu ; это понижает эдс элемента. Сопроотивление элемента Даниэля при обычных средних размерах колеблется около 0,5 ома; оно уменьшается с температурой.

Амальгамировка Zn . Обычный Zn содержит в себе примеси свинца, железа, графита; частицы этих тел образуют с Zn в H_2SO_4 так называемые „местные“ замкнутые элементы, действие которых заключается в растворении Zn (с выделением H_2) в разомкнутом элементе. Эта нежелательная трата материала не может быть предотвращена химическим очищением Zn , так как оно обходится дороже самого Zn ; она предотвращается покрытием Zn слоем ртути, которое называется амальгамировкой Zn (Стерджен, 1830 г.).

Для этого цинковый электрод, смоченный раствором H_2SO_4 , натирают ртутью с помощью жесткой щетки и затем некоторое время оставляют в вертикальном положении, чтобы дать возможность излишку ртути стечь с его поверхности.

При хорошо амальгмированном Zn местных действий уже не наблюдается. Амальгамировка Zn повышает эдс.

Элемент Мейдингера представляет собою видоизменение даниэлевского (рис. 74-б). В нем растворы CuSO_4 и H_2SO_4 налиты

один над другим; последний, как более легкий, наливается сверху.

Отсутствие пористого сосуда уменьшает внутреннее сопротивление элемента. Сосуд *A* наполнен кристаллами CuSO_4 . Медная проволока, ведущая к *Cu*, в том месте, где она проходит чрез H_2SO_4 , окружена стеклянной трубкой.

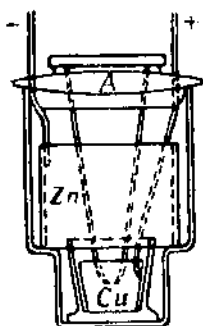


Рис. 74-б.

Элемент Грове состоит из *Zn*, погруженного в H_2SO_4 , и *Pt*, погруженной в крепкую азотную кислоту; эта последняя и служит деполяризатором: H_2 , чрез пористую стенку, вступает в HNO_3 , образует пары NO_2 и воду; таким образом водород не отлагается на положительном электроде (*Pt*). Отрицательным электродом в элементе Грове, как и во всех описываемых элементах, служит *Zn*.

Выделение вредных паров NO_2 ограничивает применение элемента Грове, хотя его эдс может быть доведена до 1,95 *V*, тогда как внутреннее сопротивление низведено до 0,15 ома.

Элемент Бунзена отличается от элемента Грове лишь заменой дорогой *Pt* углем (так называемым ретортным). Видоизменение его — элемент Поггендорфа: азотная кислота заменяется двуххромовым кали.

В элементе Лекланше деполяризатором является перекись марганца, находящегося в смеси с другими веществами около угольного электрода; выделенный цинком водород, отнимая кислород от перекиси, обращает ее в Mn_2O_3 и воду; $E = 1,5 \text{ V}$.

Такой же деполяризатор применяется и в так называемых „сухих“ элементах (напр., Гелле-зена), которые устроятся так, что их можно держать в каком угодно положении.

Элемент Грене (рис. 75) состоит из раствора двуххромокалиевой соли с погруженными в нее электродами *Zn* и *C*. Эта жидкость обладает свойством деполяризовать. Обыкновенно применяются два угольных электрода для уменьшения сопротивления элемента; *Zn* пластинка должна быть поднята из жидкости, когда элемент не действует, так как иначе на ней отлагаются нерастворимые хромовые соли, мешающие работе элемента. *Zn* элемента Грене нет надобности амальгамировать.

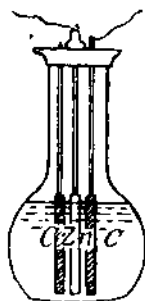


Рис. 75.

У свежего элемента Грене $E = 2\text{ V}$.

Элемент Кларка принадлежит к так называемым „нормальным“, т.-е. таким, эдс которых долгое время остается точно постоянной; такими элементами пользуются, как эталонами эдс, при чем заводы, изготовляющие их, точно указывают их эдс и ее изменение с температурой. Эдс элемента Кларка при 15°C равна $1,434\text{ V}$; она уменьшается приблизительно на $0,077\%$ при повышении температуры на 1°C .

Относительно всех элементов без поляризации нужно иметь в виду, что они правильно действуют лишь при токе, не превосходящем некоторого предельного (обыкновенно в несколько ампер); при большем токе является поляризация, и эдс элемента падает. Особенно важно это замечание по отношению к нормальным элементам, которые допускают ток только в 10^{-2} или 10^{-3} A .

9. Аккумуляторы. Аккумуляторы представляют собой вольтметры, поляризацию которых пользуются, как вторичным источником электрической энергии.

Аккумулятор Плантэ состоит из свинцовых электродов, покрытых обычным для Pb слоем окисла, опущенных в подкисленную воду; при пропускании (рис. 76) чрез него тока его анод, вследствие выделения на нем O_2 , покрывается тонким слоем PbO_2 , а отрицательный электрод — слоем чистого губчатого свинца (выделяющийся на нем H_2 отнимает кислород от окиси); кроме того происходят еще более мелкие реакции, как, например, образование раствора серно-кислого свинца.

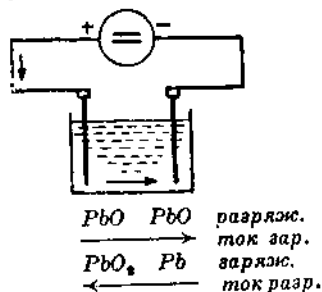


Рис. 76.

Такие видоизмененные электроды, находясь в подкисленной воде, представляют собою заряженный аккумулятор, или вторичный элемент с PbO_2 , как $(+)$, и чистым свинцом, как электрод низшего потенциала. Если, следовательно, его электроды соединить проводником, то ток (вторичный) по жидкости аккумулятора пойдет в направлении обратном (см. рис. 76) тому, по которому шел ток, зарядивший аккумулятор. Ток разряда, сообразно своему направлению, выделяет H_2 на PbO_2 , раскисляя его в окись свинца PbO , и O на Pb , образуя на его поверхности PbO . Действие аккумулятора прекратится, когда оба электрода окажутся покрытыми слоем PbO .

„Емкость“ аккумулятора определяется обыкновенно тем числом кулонов Q , которое он отдает в токе разряда. Если аккумулятор давал ток i в течение t сек, то емкость его равна

$$Q = i \cdot t \text{ кулонов.}$$

Ее нередко измеряют, во избежание больших чисел, не в кулонах, но в ампер-часах.

Так как разряд аккумулятора представляет собою химическое явление обратное явлению заряда, то это количество Q , по закону Фарадея, должно быть равно количеству электричества (Q_1), прошедшего через аккумулятор в другом направлении во время зарядки. Вследствие несовершенства приборов, например, опадания PbO_2 с пластинки, Q всегда меньше Q_1 . Величина $\frac{Q}{Q_1}$ называется отдачей аккумулятора; она в хороших аккумуляторах колеблется около 90%.

Емкость аккумулятора нельзя увеличить излишнюю продолжительностью зарядки. Опыт показывает, что слой PbO_2 образуется всегда лишь некоторой определенной толщины; когда образование его закончилось, дальнейшее прохождение электричества будет иметь результатом лишь разложение жидкости и образование пузырьков H_2 и O (аккумулятор „закипел“); энергия электричества не будет уже накапливаться. Отсюда следует, что вся масса пластины является большим, не действующим грузом; однако, было бы непрактично делать пластины очень тонкими в виду малой жесткости свинца.

Действующий слой увеличивается помощью *формовки*, т.-е. попеременного заряжения и разряжения только-что приготовленного аккумулятора, при чем последовательно увеличивается продолжительность зарядки; формовка доводит толщину действующего слоя до нескольких десятых мм. Только формованные аккумуляторы применяются на практике.

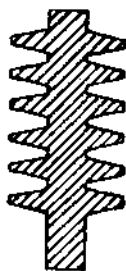


Рис. 77.

Емкость аккумулятора может быть увеличена увеличением поверхности его пластин; так, например, в аккумуляторах пластинки снабжаются поперечными выступами (рис. 77). Имеется еще много других видоизменений основного типа аккумулятора Плантэ. Аккумулятор Фора формируется искусственно: он состоит из свинцовых пластин с ячейками, имеющих вид решеток или вафельниц; эти ячейки заполняются порошкообразными массами (тестом) из глета PbO — для одного электрода, и сурика Pb_2O_3 — для другого. Эти массы,

вследствие именно своей порошкообразности, представляют гораздо большую действующую поверхность, чем слой окисла в аккумуляторе Плантэ; поэтому аккумулятор Фора отличается большею, чем тип Плантэ, емкостью, при том же весе пластин. Формовка по методу Фора заканчивается пропусканием тока один раз в направлении от Pb_3O_4 к PbO ; этим током действующий слой первой пластины обращается в PbO_2 и второй — в губчатый Pb . Эти пластины: перекись свинца и губчатый свинец и составляют, подобно предыдущему, аккумулятор, готовый к действию с $(-|-)$ на PbO_2 и $(--)$ на Pb . Аккумуляторы Фора особенно предпочтительны для трамваев и автомобилей, хотя применение их затрудняется легкостью опадания массы с пластин при толчках и тряске.

С целью уменьшить возможность опадания массы различные изобретатели придумали много различных форм для ячеек в пластинах.

Технический аккумулятор состоит из изолирующего ящика, наполненного подкисленной водой, в который вставляется несколько параллельных пластин; из них все четные и все нечетные соединены проводниками. Одни служат $(|-)$, другие $(-)$. Пластины устанавливаются близко одна к другой, изолированные друг от друга стеклянными палочками.

Вследствие большой поверхности электродов и малой толщины столба жидкости между ними внутреннее сопротивление аккумулятора обыкновенно около 0,001 ома. ЭДС заряженного аккумулятора более 2V. Оба эти обстоятельства и делают из аккумулятора весьма практичный и распространенный генератор электрической энергии.

Через аккумулятор как при разрядке, так и зарядке не может быть пропущен ток больше некоторого максимального, указываемого аккумуляторным заводом. Поэтому аккумуляторы нельзя замыкать на короткое и вообще на слишком малое сопротивление.

Аккумуляторы приходится соединять в параллельные группы не для того, чтобы уменьшить их (и без того ничтожное) внутреннее сопротивление, но для того, чтобы ток цепи, если он больше максимального, разветвился на несколько аккумуляторов.

10. Примеры. 1. Какой наибольший ток может дать один элемент Даниэля ($E = 1,1$ V) со внутренним сопротивлением $0,5\Omega$?

$$i = \frac{E}{r_2 + r_1} = \frac{1,1}{0,5} = 2,2A.$$

2. На какое наименьшее сопротивление может быть замкнут аккумулятор ($E = 2$), допускающий ток не свыше 5 А?

$$5 = \frac{2}{0,001 + r_1}; r_1 = 0,4 \Omega.$$

3. Аккумулятор заряжался током $i_1 = 2$ А в течение 5 часов; в течение какого времени t можно получать от него ток $i = 0,5$ А, если его отдача составляет 80%?

$$\frac{it}{i_1 t_1} = 0,8; t = 16 \text{ час.}$$

4. Сколько элементов ($r_2 = 1 \Omega$, $E_0 = 2$ В) необходимо для питания 10 параллельных ламп накаливания, требующих у своих зажимов 100 В и пропускающих каждая 0,5 А. Полный ток = 5 А.

Для получения 100 В во внешней цепи берем n последовательно соединенных элементов:

$$E = E_1 + E_2; nE_0 = 100 + n \cdot r_2 \cdot 5;$$

или, подставляя заданные величины,

$$2n = 100 + 5 \cdot n \cdot r_2. \quad (*)$$

При $r_2 = 1$ получается отрицательный результат, показывающий невозможность получить при таком большом r_2 во внешней цепи 100 В. Берем вместо каждого элемента группу из z элементов, соединенных параллельно; тогда ($r_2 = 1$)

$$2n = 100 + \frac{5 \cdot n}{z}.$$

Если принять $z = 5$, $n = 100$; всего элементов требуется $n \cdot z = 500$.

Для той же цели требуется всего около 50 аккумуляторов ($r_2 = 0,001$; $E_0 = 2$ В). В этом случае уравнение (*) обращается в

$$2n = 100 + 5n \cdot 0,001,$$

откуда приблизительно $n = 51$.

Этот пример показывает в какой мере более применимы аккумуляторы, чем первичные элементы, для получения тока в технических размерах.

ГЛАВА IX.

ЭЛЕКТРОСТАТИКА.

1. Статическая единица электричества. Электричество в покое, в статическом состоянии характеризуется двумя следующими свойствами: 1. Существует два рода электричества, одно, получаемое, например, от стекла, потертого об амальгамированную кожу, „стеклянное“; другое, например, от смолы, потертой о шерсть, „смоляное“. Такое представление о двух видах электричества называется *дуалистическим*. 2. Тела, наэлектризованные однородно, или однородные заряды, взаимно отталкиваются, разнородные заряды взаимно притягиваются.

На взаимном отталкивании однородных зарядов основано действие электроскопа, простейшего прибора, служащего для обнаружения электричества. Он состоит из двух легких проводящих тел, например, соломинок, золотых или алюминиевых листков и т. п., подвешенных к проводящему стерженьку (рис. 78). Если *прикоснуться* заряженным телом до этого стерженька, электричество распространится¹⁾ по проводникам по всему электроскопу, и листочки раздвинутся друг от друга.

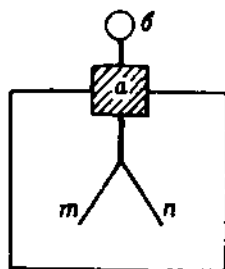


Рис. 78.

Электростатика, как математическая наука, возникла с того времени, когда Кулон открыл закон, по которому происходит взаимодействие электричеств. Закон Кулона гласит, что два количества электричества Q и Q' , находящиеся в точках на расстоянии r одна

¹⁾ „Распространится“ — значит, пойдет ток, потому что существует разность потенциалов; заряженное тело имеет иной потенциал, чем электроскоп. Невозможно дать реальное описание электростатических явлений без того, чтобы при первых же шагах не пользоваться понятиями о движении электричества; отчасти поэтому нами и отведено первое место учению о токе.

от другой, взаимно действуют прямо пропорционально произведению $Q \cdot Q'$ и обратно пропорционально квадрату расстояния.

Этот закон относится одинаково и к притяжению, и к отталкиванию.

Если мы напишем закон Кулона в виде:

$$F = \frac{Q \cdot Q'}{r^2},$$

то можем установить единицу количества электричества в любой системе измерений, подобно тому, как это сделано для единицы количества магнетизма (стр. 97). Мы имеем два единичных заряда, если они, во-первых, одинаковы, $Q = Q'$, и, во-вторых, действуют друг на друга с единичною силою ($F = 1$), находясь на единичном расстоянии ($r = 1$). Не должно думать, что если выбрать систему CGS измерений, то мы получим, по закону Кулона, как раз ту единицу количества электричества, которая, проходя чрез сечение проводника в 1 *сек*, производит единичный CGS ток, определенный на стр. 99 и равный 10 А. Опыт показывает, что тот ток, при котором в одну *сек* через каждое сечение проводника проходит эта новая единица количества электричества, равен всего лишь ничтожной части ампера, приблизительно

$$3,3 \cdot 10^{-10} \text{ А},$$

тогда как единичный CGS ток равняется 10 А.

Следовательно, опыт показывает, что нельзя смешивать единицы, получаемые из электростатического закона Кулона, *электростатические*, с тою системою, которая основывается на *электромагнитных* действиях тока, хотя бы в обоих случаях измерения производились на одном и том же общем основании: в *см*, *г*, и *сек*. Так, например, для количества электричества:

$$1 \text{ ед. эл.-магн. CGS} = 10 \text{ кулонов} = 3 \cdot 10^{10} \text{ ед. эл.-ст. CGS};$$

$$1 \text{ ед. эл.-ст.} = 3,3 \cdot 10^{-10} \text{ кулона}; 1 \text{ кул.} = 3 \cdot 10^9 \text{ ед. эл.-ст.}$$

Мы можем отсюда продолжать электростатическую систему, например, установить эл.-ст. единицу тока, о которой только-что было упомянуто, равную $3,3 \cdot 10^{-10} \text{ А}$ и т. д., и должны признать, что существуют две системы электрических измерений: одна — электромагнитная, основанная на законе Кулона, для магнитных масс и на взаимодействии магнита с электричеством в токе, другая электростатическая — на законе Кулона для электрических масс, находя-

щихся в покое, и никак не взаимодействующих с неподвижным магнитом. ¹⁾

Не излишне задуматься в количественную разницу между двумя указанными единицами: два заряда, каждый по единице электростатической, поставленные на расстоянии 1 см, отталкиваются, согласно своему определению с силой в одну дину; следовательно, два кулона, находящиеся на том же расстоянии, отталкиваются с силой, приблизительно, в 10^{19} раз большею, т.-е. с силой в 10 000 миллионов тонн (точнее, $88,2 \cdot 10^8$ тонн); такие силы, как замечает Фарадей, способны произвести тропическую бурю. Отсюда мы видим, что небольшие (с точки зрения практики постоянного тока) скопления электричества способны произвести эл.-статически огромные действия; но необходимо здесь же добавить, что такие скопления невозможно удержать статически ни на одно мгновение; это будет понятно ниже (§ 7), когда мы обратим внимание на действительное место электрических явлений.

Сейчас мы рассматриваем электрические заряды отвлеченно, и условно предполагаем, что нет никаких препятствий накапливать их в любой точке в каком угодно количестве.

Следует обратить внимание на замечательный смысл самого числа, выражающего отношение единицы количества электричества электромагнитной к единице количества электричества электростатической; если обе взяты в CGS системе, то их отношение равно $3 \cdot 10^{10}$; это число совпадает с одною из самых основных физических величин, а именно равно скорости света в пустоте, если ее измерить в той же CGS системе: скорость света в пустоте равна

$$3 \cdot 10^{10} \text{ см в сек.}$$

Объяснение того, что отношение единиц для количества электричества в этих двух системах действительно есть скорость по своему смыслу, дается в главе XIV. А из того, что эта скорость есть как раз скорость света, мы заключаем, что, всматриваясь в основные электрические данные, мы попадаем в область световых явлений или, по крайней мере, в область общую для световых и электрических явлений.

2. Принцип сохранения электричества — в статике выступает следующим образом (ср. стр. 21).

¹⁾ Иными словами, статическое электричество не вызывает никакого магнитного потока.

Электричество стеклянное и смоляное взаимно противоположны; действительно, вводя в тело (напр., электроскоп), наэлектризованное стеклянным электричеством, смоляной заряд (или наоборот), мы заметим, по всем его действиям, что оно разэлектризовывается; листочки электроскопа сближаются; и когда мы введем смоляной заряд, равный стеклянному, бывшему в нем, тело окажется совершенно лишенным электрического состояния.

Такие противоположные, взаимно-уничтожающие количества можно условно рассматривать, как положительные и отрицательные числа в алгебре; если они равны по своей абсолютной величине, то их алгебраическая сумма есть нуль.

В виду этого в каждом теле не наэлектризованном, находящемся в нормальном состоянии, можно предполагать какие угодно, но только одинаковые, количества и положительного (стеклянного) и отрицательного (смоляного) электричества, существующих в нем одновременно, и потому не оказывающих никакого внешнего электростатического действия.

Допустимость этого весьма легко доказать помощью электроскопа; следует *поднести* к нему (но не прикоснуться), заряженное тело; листочки электроскопа разойдутся. Это не есть заряд, сообщенный электроскопу; стоит лишь снова удалить заряженное тело, листочки упадут, показывая этим, что электроскоп остался при своем нормальном электричестве.

Значит, листочки разошлись от электричества, присущего неза-
ряженному электроскопу. Чтобы ясно представить себе весь процесс, предположим, что (+) заряженное тело поднесено (рис. 79) сверху;

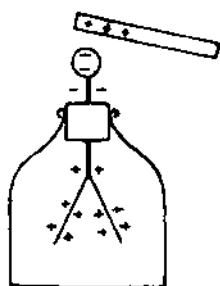


Рис. 79.

тогда некоторая часть нормального (—) электричества притянется наверх, и листочки окажутся заряженными (+) электричеством, которое отталкивается вниз, как можно дальше от поднесенного предмета.

Если дотронуться до шарика или стерженька электроскопа, находящегося под таким „влиянием“, рукою, то (+) электричество будет оттолкнуто еще дальше, чрез наблюдателя в землю; оно выйдет из электроскопа, и он становится заряженным (—); листочки этого не показывают (рис. 80) потому, что заряд весь собрался в верхней части прибора; если теперь удалить (отняв раньше руку) влияющий предмет, листочки разойдутся от растекавшегося по всему прибору (—)

заряда.¹⁾ Таким образом, можно зарядить тело электричеством, противоположным тому, какое у нас имеется в первоначально заряженном предмете.

Все это доказывает, что ненаэлектризованное тело обладает обоими электричествами.

Следовательно, нет надобности предполагать, что, когда тело электризуется, электричество создается; и без этого предположения является два способа объяснить, что значит — наэлектризовать, например, положительно: во-1-х, что мы увеличили в теле колич. (+) электричества, отняв ее от другого тела; во-2-х, что мы уменьшили в теле колич. (—) электричества, перенеся его в какое-либо дру-

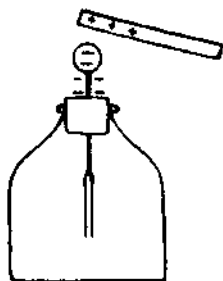


Рис. 80.

гое тело. При том и другом процессе электричество в мире сохраняется. Но, кроме того, оба процесса приводят к мысли, что при всякой, например (+), электризации какого-либо тела, мы непременно найдем другое тело, наэлектризованное противоположным электричеством совершенно в том же количестве.

Опыт подтверждает этот вывод во всех разнообразнейших случаях получения электрического состояния; если стекло при трении электризуется положительно, то кожа, о которую оно было потерто, оказывается наэлектризованною отрицательно; подобное же наблюдается при всех бесчисленных случаях электризации *трением*; точно то же самое и при всех других способах электризации; цинк при *прикосновении* с медью электризуется плюсом, а медь — минусом; когда кристалл турмалина электризуется при *нагревании* или *охлаждении*, то его два конца обнаруживают противоположные и равные заряды; *пламя* светильного газа оказывается наэлектризованным, положительно в своей внешней части и отрицательно — во внутренней; в нервах *живого* организма наблюдаются противоположные электризации — по их оси и по поверхности, и т. д.

В этих фактах и сказывается сохранение электричества.

3. Унитарная теория. Внимание физиков было обращено на этот факт Франклином, занимавшимся электрическими явлениями

¹⁾ Любопытная вариация этого опыта: заряд подносится к электроскопу снизу (заряжается металлическое днище электроскопа); если в этом случае прикоснуться рукою, то расхождение листочков может даже увеличиться.

в середине XVIII в. Его взгляд был проще, чем изложенный выше, возникший в науке после Франклина. Франклин полагал, что противоположность двух электричеств есть противоположность изобилия и нищеты; положительная электризация — изобилие электричеством, отрицательная — недостаток его; тело не назлектризованное обладает электричеством в нормальном количестве.

По этой теории, электричество одно и вечно сохраняется в неизменном количестве; отсюда и название: унитарная теория. Электризуя, мы накапливаем его в одном теле в изобилии, отнимая от другого тела, которое становится ненормально бедным. Франклин всегда электризовал от стекла и сделал произвольный вывод, что тело, назлектризованное стеклянным электричеством, и обладает электричеством в избытке; отсюда произошло название стеклянного заряда „положительным“, отсюда же и все наши условия относительно направления тока и т. п.

Но совершенно с таким же правом можно было бы смоляной заряд назвать избытком и считать „отрицательное“ электричество тем единым электричеством, которое принимается унитарной теорией (ср. гл. XIII, § 6).

Унитарная теория была вытеснена дуалистической (см. § 1) потому, что ею трудно объяснить взаимное отталкивание обедненных электричеством тел: $(+)$ заряды взаимно отталкиваются, так как электрические частицы взаимно отталкиваются; $(+)$ и $(-)$ взаимно притягиваются, так как электричество, изобилующее в одном теле, и материя без электричества, оставшаяся в другом, взаимно притягиваются; $(-)$ и $(-)$ взаимно отталкиваются, так как материя с материею (бедные электричеством) взаимно отталкиваются. Но последнее утверждение находится в противоречии с ньютоновским законом всемирного притяжения материи к материи.

4. Конденсатор; электрическое поле. Независимо от того, по какой бы теории мы ни рассуждали, факт остается фактом; всякая электризация сопровождается противоположной в таком же количестве. Все одноименные элементы всякого заряда на теле, взаимно отталкиваясь, располагаются как можно дальше друг от друга *по поверхности* назлектризованного тела; но этот заряд взаимно притягивается с тем противоположным, который непременно одновременно возникнул; с самого начала своего возникновения они стремятся вновь слиться вместе. Необходим изолятор между этими заряженными поверхностями двух тел, который бы мешал исчезнуть зарядам.

Таким образом, явление электризации всегда характеризуется двумя противоположными, „полюсными“ поверхностями *A* и *B* с изолятором *C* между ними (рис. 81); все это вместе называется конденсатором. В технике под словом „конденсатор“ разумеется прибор, состоящий из изоляционной прослойки между двумя металлическими листами (обкладками), заряжаемыми противоположными и равными зарядами. Но для нас конденсатор это — явление, сопровождающее всякий заряд.



C

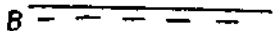


Рис. 81.

В изоляторе конденсатора действуют электрические силы; и мы можем вообразить в этом поле электрических сил пути, по которым двигалась бы единица количества электричества, помещенная в это поле. Если эту единицу предполагать положительную,

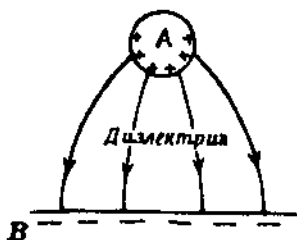


Рис. 82.

то полученные силовые линии будут иметь направление, указанное на рис. 82 стрелками. Фарадей, увлекаемый мыслью о невозможности действия на расстоянии, положенного в основание кулоновского закона, начал рассматривать это изображение электрического поля, как картину особых натяжений, происходящих от деформации, возникшей в изо-

ляторе; по его почину, изолятор в таком состоянии называют диэлектриком.

Линии этого электрического потока стремятся укоротиться — отсюда взаимное притяжение обкладок; поток стремится расшириться — отсюда взаимное расталкивание элементов одного и того же заряда, как концов линий потока. Но при разбухании потока отдельные его линии становятся слишком длинными: статическое состояние наступает тогда, когда средняя длина потока и среднее сечение соответствуют наименьшему сопротивлению для него при данных поверхностях и расстоянии „заряженных“ тел.

В этих представлениях мы видим тот же метод, который столь хорошо приложим к явлениям в магнитном поле. Однако, с первого же шага обнаруживается замечательная особенность электрического потока; в статическом состоянии он всегда разомкнут; заряды на обкладках и представляют собою противоположные концы его линий. Действительно, опыт доказывает полное отсутствие электри-

ческих сил, электрического поля внутри наэлектризованного проводника. Для магнитного потока не существует таких „проводников“, внутрь которых статическое магнитное поле не могло бы проникнуть.

5. Диэлектрическая постоянная. Главнейшим доводом фарадеевского представления является следующее: если заменить одно проводящее вещество обкладок другим, например, медь железом или алюминием, или золотом и т. д., не изменяя только формы и размеров поверхностей этих обкладок и их относительного расположения, мы не заметим ни малейшего изменения в действии конденсатора, если его заряжать всегда одним и тем же количеством электричества. Вещество обкладок, вообще их внутренность ¹⁾ не имеет значения; они играют роль только своею поверхностью, ограничивающею диэлектрик; обкладки должны быть только проводниками.

Наоборот, вещество диэлектрика определяет силы, действующие в конденсаторе при данном заряде; замена одного изолятора другим может изменить их во много раз. Фарадей первый указал на значение вещества диэлектрика. Это значение мы свяжем, прежде всего, с понятием о проводимости эл. потока. Если с краю, например, воздушной прослойки конденсатора мы поднесем кусок стекла (рис. 83),

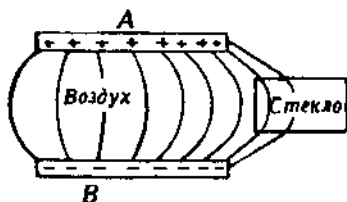


Рис. 83.

то электрический поток примет форму, указывающую на его большее стремление пройти по этому диэлектрику, чем по воздуху. ²⁾ Но при данной конфигурации обкладок поток может получить еще меньшее сопротивление, чем при положении стекла на рис. 83, если пойдет по кратчайшему пути

между обкладками. Вследствие этого стекло вытягивается в пространство между A и B так, чтобы поток получил наименьший возможный путь и при том большую частью чрез стекло.

Эти явления выражают, что стекло лучше проводит электрический поток, чем воздух; оно имеет, как говорят, большую диэлектрическую постоянную (k).

¹⁾ Напомним, что внутри проводника никаких электрических сил не наблюдается при статическом состоянии заряда.

²⁾ Как показывает рис. 83 по сравнению с рис. 84, при этом переместятся и заряды по поверхностям металлических обкладок, произойдут токи, электрическая энергия несколько уменьшится по одной уже этой причине (джоулево тепло). В электростатике мы не обращаем внимания на эту часть процесса.

Приводим приблизительные k для некоторых изоляторов, измеренные относительно пустоты (ср. стр. 229):

водород	1,000254
воздух	1,000590
парафин	1,8
керосин.	2
эбонит	2
сера	4
стекло	6
вода	80

Эта таблица тел не имеет ничего общего с таблицею тел, расположенных по возрастанию μ ; при этом замечательно, что не существует тела, имеющего меньшую диэлектрическую постоянную, чем пустота; у всех известных тел $k > 1$.

6. Работа конденсатора. Обкладки заряженного конденсатора стремятся сблизиться до прикосновения; если мы им позволим сблизиться, они могут двигать за собой соответственную нагрузку, двигаться против соотв. сил трения, словом, совершать работу. Отсюда следует, что заряженный конденсатор обладает энергиею в электрической форме; его работа есть превращение электрической энергии в другую форму; силы, стремящиеся сблизить обкладки конденсатора, и выражают стремление электрической энергии к такому преобразованию, к рассеянию.

По фарадеевской теории все явление электризации заключается в натяжениях (как бы особая электрическая деформация) того объема диэлектрика, по которому проходит силовой поток. Вся энергия заряженного конденсатора заключается в этом объеме. Она определяется величиною этого объема, натяжениями в нем и свойствами диэлектрика. Отсюда мы можем ожидать, что конденсатор способен совершить работу и без того, чтобы его обкладки сближались, если мы дадим возможность заместиться одному диэлектрику другим; это и происходит при втягивании стекла, о котором было выше упомянуто. Обратно, вынимая стекло, мы затрачиваем работу, а энергия конденсатора возрастает.

Таким образом энергия конденсатора оказывается меньшею, если его прослойкою сделалось стекло вместо воздуха, при прежней величине заряда; следовательно, та же самая густота потока, всегда определяемая зарядом (§ 4), представляет собою в стекле меньшие напряжения, меньшие силы; или, следовательно, два заряда, окруженные

средою с большею диэлектрическою постоянною, обнаруживают меньшие электрические силы, чем те же два заряда, одинаково расположенные, но окруженные пустотой. Закон Кулона требует, значит, поправки на диэлектрическую постоянную, а именно:

$$F = \frac{Q \cdot Q'}{k \cdot r^2}.$$

Это выражение и может служить для вычисления k , если сравнить на опыте силы F в пустоте и в теле с диэлектрической постоянной k (ср. стр. 78).

7. Разность потенциалов; емкость. Напряжение электрического поля. Энергия конденсатора. Всякий раз, когда в конденсаторе совершается механическая работа его собственными электрическими силами, без притока энергии извне, энергия конденсатора уменьшается; так происходит, например, когда его обкладки сближаются; и, наоборот, когда механическая работа совершается против электрических сил внешним двигателем, например, когда мы раздвигаем обкладки, энергия конденсатора возрастает. Так как в обоих этих случаях конденсатор ни получает, ни теряет заряда, то необходимо признать, что его энергия зависит не только от зарядов на обкладках, но еще и от другой величины. Эта вторая величина называется разностью потенциалов этих зарядов.

При заряджении конденсатора, $(-\frac{1}{2})$ электричество с одной обкладки (напр., A , рис. 84) переносится на другую (B), против сил того поля, которое тотчас же образуется между A и переносимым зарядом; на каждую единицу переносимого количества электричества вытягивается известное число линий электр. потока; при этом совершается работа, возрастает энергия электричества, энергия конденсатора, потенциал (A), увеличивается (условно), а потенциал (B) уменьшается.

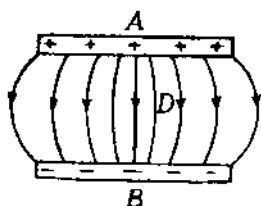


Рис. 84.

Так возникает разность потенциалов, E ; с нею появляется и взаимодействие обкладок, она же, как мы видели выше, делает возможным электрический ток, а достигнув известной величины, производит искру сквозь диэлектрик.

Теперь мы понимаем, почему нельзя вводить в конденсатор беспредельное количество электричества (стр. 167); заряжая обкладки, мы производим натяжение в диэлектрике; увеличивая заряд, мы увеличиваем это натяжение; при всяком расположении обкладок натя-

жение может быть увеличено лишь до некоторого предела, перейдя который мы получим разряд.

Мы уже отметили, что способы описания поля электрического совершенно подобны способам описания магнитного поля. Теперь мы можем еще больше уточнить это подобие. В диэлектрике конденсатора нами мыслится поток электрической индукции, характеризуемый в каждой точке поля густотой (N). Общее число линий этого потока определяется теми зарядами, которые имеются на обкладках конденсатора. Это — количественная сторона электрического поля. Один и тот же поток электрической индукции вызывает различное электр. напряжения, смотря по тому, в каком диэлектрике он находится; чем больше диэл. постоянная k , тем меньшее напряжение соответствует данному N . Если электр. напряжение обозначим буквою X , то зависимость его от густоты потока выражается таким соотношением:

$$X = \frac{N}{k}, \text{ или } N = kX.$$

Вместо „напряжения“ можно говорить: сила, действующая в данной точке поля на единицу электричества, или густота силовых линий в данной точке электр. поля.

Очень часто, хотя и неправильно, словом „напряжение“ обозначают другую величину, а именно разность потенциалов между двумя точками проводника, по которому идет электрический ток. Иногда „напряжение“ приписывается и какой-либо одной точке на проводнике под током; в этом случае, конечно, разумеется разность потенциалов этой точки и земли. Однако, такое употребление одного и того же слова в различных смыслах не вносит большой путаницы, так как всегда по остальным словам фразы легко бывает понять, какой смысл разумеется в каждом данном случае.

Совершенно аналогично магнитному полю мы можем рассматривать густоту потока электрической индукции, как меру некоей особой (электрической) деформации в диэлектрике. Напряжение поля измеряет, какие натяжения появляются вследствие этой деформации; диэлектрик с большим k будет по этой аналогии подобен телу, в котором обнаруживаются небольшие силы упругости при данной деформации, телу, которое имеет малый „модуль упругости“.

Если поле равномерно, т.-е. во всех его точках X одно и то же, и поле имеет длину L (рис. 85), то XL представляет собою работу, совершаемую (+) единицею электричества в этом поле, когда она пройдет его от A до B ; иными словами, XL есть та потенциальная

энергия, которая приходится на каждую $(+)$ ед. электричества, не начавшую еще двигаться под действием силы X ; таким образом, XL есть то самое E , которое мы определили на стр. 25. Если $XL = E$, то $X = \frac{E}{L}$; т. е. напряжение равно падению потенциала на единицу длины равномерного поля, или так называемому градиенту поля.

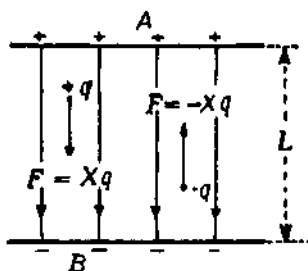


Рис. 85.

Отрицательный заряд, например, электрон, в том же поле AB (рис. 85) будет двигаться от B к A .

Если сила, испытываемая в поле единице электричества, есть X , то сила, испытываемая зарядом q , равна $F = X \cdot q$.

Внутри статически заряженного проводника нет изменения потенциала, нет разности потенциалов, так как поток электрической индукции обрывается на его поверхности: *статически заряженный проводник характеризуется по всей своей внутреннейности одним и тем же потенциалом.*

Продолжаем выяснение понятия E ; чем дальше заряжается конденсатор, чем больший заряд Q переносится с A на B , тем более густым становится поток в диэлектрике, увеличиваются натяжения, увеличивается и E . Таким образом, E оказывается прямо пропорционально Q .

Но если к обкладке A мы присоединим вторую такую же (рис. 86), тот же заряд распределится на большую поверхность, поток в диэлектрике станет менее густым, силы уменьшатся, уменьшится E . Точно также уменьшится разность потенциалов, если обкладки конденсатора сблизятся (хотя в этом случае электрические силы могут и увеличиться), так как уменьшится объем диэлектрика, занятый наиболее густым полем (совершена работа электрическими силами). Наконец, уменьшится E , если диэлектрик конденсатора заменен телом с большим k , так как в этом случае ослабнут все натяжения (стр. 174).

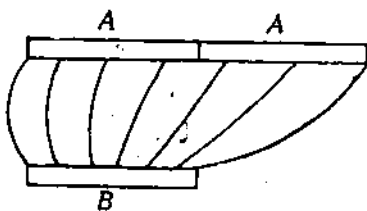


Рис. 86.

Итак, заряд Q , сообщенный обкладкам конденсатора, вызывает тем меньшую разность потенциалов, чем больше размеры этих обкла-

док, чем ближе они друг к другу, чем больше диэл. пост. диэлектрика.

Кроме того E зависит и от формы поверхностей этих обкладок, так как и она влияет на характер потока, на натяжения в различных его местах.

Все это вместе определяет емкость конденсатора, которую мы будем обозначать буквою C . Согласно определению ее, как величины, уменьшающей E , мы можем написать, имея в виду, что Q увеличивает E :

$$E = \frac{Q}{C} \quad (25)$$

Емкость заключает в себе все, что понижает E ; она увеличивается с увеличением размеров обкладок, с уменьшением расстояния между ними и увеличением k диэлектрика; она зависит и от формы конденсатора.

Таким образом, мы выразили E через Q , введя новое понятие: емкость конденсатора. Эту величину можно определить по уравнению (25), из равенства

$$Q = C \cdot E;$$

отсюда выводим, что *емкость конденсатора численно равна тому заряду, который доводит данный конденсатор до разности потенциалов равной единице*. Если $E = 1$, то, действительно,

$$Q = C \cdot 1.$$

В практической системе единиц это определение приводит к такой единице емкости: единичною емкостью обладает конденсатор, который, будучи заряжен одним кулоном, показывает на своих обкладках разность потенциалов в один вольт; эта единица емкости практ. системы называется *фарадой*. Мы уже видели (стр. 167), что заряжать кулонами невозможно, так как они вызывают чрезвычайные напряжения, между тем, как только-что определенный конденсатор, с емкостью в одну фараду, получает под зарядом в 1 кулон сравнительно ничтожное напряжение. Следовательно, фарада представляет собою какую-то чрезмерно большую емкость. Это — единственная единица, логически выведенная в практической системе и оказывающаяся практически неприменимою. Обыкновенно пользуются ее миллионною частью, *микрофарадою*.

Окончательное понимание величины E получается из выражения энергии заряда помощью разности потенциалов.

Чтобы найти выражение для энергии конденсатора через его заряд Q и разность потенциалов E , и притом чтобы этой E придать тот же смысл, какой она имеет в учении об электрическом токе, мы предположим теперь, что A и B соединены проводником, через который они и разрядились. Какую энергию выделит этот ток? Первая (бесконечно малая) часть заряда пройдет под E , но следующие — постепенно все под меньшим напряжением, так как с убыванием Q уменьшается и E [форм. (25)]; последняя (бесконечно малая) часть заряда пройдет под нулевым напряжением. Мы можем сказать, что все Q прошло под разностью потенциалов, среднюю между E и нулем, т.-е. под напряжением $\frac{E}{2}$.

Такой процесс выделит энергию [форм. (1)]

$$W = \frac{E}{2} Q; \quad (26)$$

такова, следовательно, и была энергия конденсатора, если ее выразить через Q и E .

С помощью определения (25) мы можем получить простою подстановкою два других выражения для энергии статического заряда:

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{1}{2} CE^2. \quad (27)$$

8. Электростатическая единица разности потенциалов. Формула (26) позволяет выразить эту единицу в вольтах. Электростатическая система CGS-ная; энергия измеряется по этой системе в эргах; следовательно, если мы имеем единичное Q при единичном E (емкость такого конденсатора должна быть тоже единичной), то получим энергию заряда равною $\frac{1}{2}$ эрга. Измеряя этот же случай в практической системе, мы должны сказать, что $8,3 \cdot 10^{-10}$ кулона (точнее, $\frac{1}{3} \cdot 10^{-9}$ кул.) имеет энергию в $\frac{1}{2} \cdot 10^{-7}$ джоуля; чтобы узнать, какова разность потенциалов в вольтах такого конденсатора, воспользуемся опять уравнением (26):

$$E = \frac{2W}{Q} = \frac{2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10^{-7}}{\frac{1}{3} \cdot 10^{-9}} \text{ V} = 300 \text{ V}.$$

Следовательно, та разность потенциалов, которая должна быть принята за ед. в электростатической CGS системе, равна 300 V.

9. Статическая работа генератора. Соединив зажимы динамо-машины, приведенной в действие соответственным двигателем, с обклад-

ками незаряженного конденсатора, мы заставим (+) электричество с одной обкладки (*a*) перетекать на другую по направлению эдс машины (рис. 87). Это будет происходить чрезвычайно короткое время, пока эдс машины сможет преодолевать все возрастающую разность потенциалов конденсатора; на рис. 87 *ab* изображает конденсатор, Γ — генератор; рис. 87 показывает, что E конденсатора, действительно, стремится создать ток обратный току от машины. С того момента, когда E конденсатора станет равной эдс машины, зарядка прекратится.

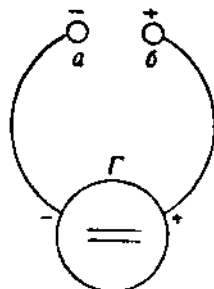


Рис. 87.

Но замечательно, что для сохранения заряда на конденсаторе машина все время должна вращаться все с той же скоростью и в том же магнитном потоке, чтобы ее E сохранила свою величину; как только эдс машины станет меньше, конденсатор даст ток от себя и разрядится, опять до равенства обеих E , машины и конденсатора.

Предполагая, что в конденсаторе не происходит никаких потерь, что его диэлектрик изолирует в совершенстве, мы должны признать, что при постоянном E на него не тратится энергии: вращение якоря необходимо лишь для того, чтобы не позволить электрической энергии конденсатора превратиться в другую форму. Такой случай „работы“ генератора называется „статической работой“. Это не есть работа. Если при этом происходит трата энергии, то она находит свое объяснение исключительно в несовершенстве приборов: трение, гистерезис, токи Фуко в якоре динамо, различные потери в двигателе и т. д.

Много примеров статической работы можно привести и из механики. Для нас представляет интерес еще одно явление: электромагнитный поток. Для *поддержания* магнитного потока вокруг проводника не требуется энергии; согласно этому и в стальном магните, непрерывно поддерживающем свой поток, не наблюдается никакой траты энергии. Но для электромагнитного поля необходим электрический ток, и если при этом и происходит трата энергии (джоулево нагревание), то она объясняется „несовершенством“ проводника, т. е. его сопротивлением; в супрапроводниках (стр. 129) ее и не происходит.

Мы предполагали, что к зажимам динамо присоединен конденсатор, но то же самое явление происходит вообще, всегда при разомкнутой машине: два ее зажима уже и представляют собою конденсатор. „Статически“ (в холостую) работающая динамомашинка имеет, следо-

вательно, между своими зажимами напряжение в точности равно ее полной эдс E .

Как только мы замкнем генератор на внешнюю цепь, напряжение между его зажимами будет меньше E ; оно будет E_1 .

Подобно динамомашине и всякий контакт, например, Zn , прикасающийся с Cu , заряжает конденсатор, присоединенный к ним, до своей полной эдс.

10. Статические приборы, служащие для измерения разности потенциалов, представляют собою конденсатор, в котором происходит какое-либо передвижение под действием электрического поля, против внешних сил. Так, например, в электроскопе с золотыми листочками (рис. 88), одною обкладкою служат эти листочки, другою — окру-

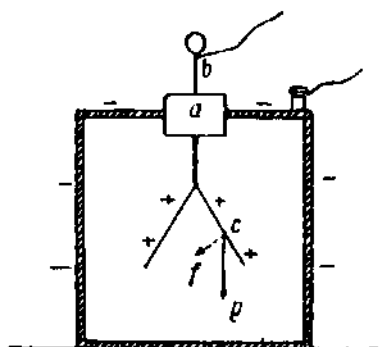


Рис. 88.

жающий их ящик или предметы, соединенные с землей; они разделены воздухом и изолирующею пробкою a . Соединив листочки (через стержень b) и коробку соотв. с двумя зажимами генератора, мы зарядим этот конденсатор до разности потенциалов генератора. Листочки будут притягиваться к стенкам ящика, поднимаясь против сил тяжести, емкость электроскопа — увеличиваться, но генератор все время поддерживает величину E ; он все время работает, во-первых,

поднимая листочки и, во-вторых, поддерживая E у конденсатора возрастающей емкости. [При возрастающей C и постоянной E энергия конденсатора увеличивается по формуле (27).] Равновесие наступит тогда, когда силы электрические не смогут уже более преодолеть все увеличивающейся силы тяжести.¹⁾ Из угла отклонения листочков можно рассчитать E , которую измеряет прибор.

Отсюда понятно, что электроскоп измеряет *потенциал*, но не заряд (Q) того тела, к которому электроскоп присоединен. Электричество

¹⁾ Эта сила увеличивается с поднятием листочка, так как та составляющая f силы тяжести p , которая вращает листок обратно к вертикальному положению, все увеличивается, приближаясь по величине к весу листочка (элементы дуги, описываемой его центром тяжести, приближаются к вертикальности).

перетекает с заряженного тела на электроскоп, пока весь проводник, состоящий из заряженного тела, электроскопа и медной проволоки, соединяющей их, не получит один и тот же потенциал относительно земли. С этого момента начнется статическое состояние (см. стр. 176).

Квадрантный электрометр представляет собою более чувствительный прибор подобного рода. Он состоит из металлического диска, разделенного на четыре квадранта, изолированных друг от друга (рис. 89, вид сверху), над ними на нити O подвешивается металлическая пластинка (бисквит), заряженная каким-либо электричеством, например $(-)$. Пары противоположных квадрантов соединены между собою; к одной паре присоединяется $(+)$ генератора, к другой $(-)$. Все четыре заряда, действуя на бисквит в одну сторону, поворачивают его против упругости кручения нити. Угол, на который окажется повернутым бисквит, измеряет E генератора.

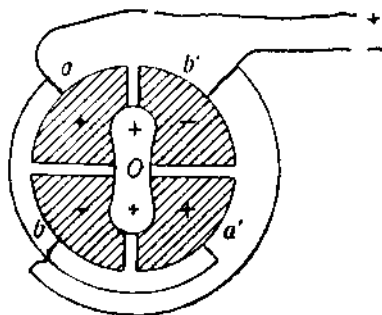


Рис. 89.

Работу отклонения подвижной части и в этом случае совершает генератор E ; вообще объяснение действия прибора то же, что и в предыдущем случае, только сила тяжести заменяется упругостью подвешивающей нити.

Подобные электростатические вольтметры применимы и к измерению напряжения между какими-либо двумя точками цепи.

11. Уединенный заряд; земля. Иногда приходится рассматривать уединенный наэлектризованный проводник. К этому отвлеченному понятию можно подойти, если представить себе, что мы удалили одну обкладку заряженного конденсатора на бесконечное или, практически, весьма большое расстояние от другой. У такого проводника существует некоторая емкость, определяющая его потенциал (положительный или отрицательный) при заряде равном единице.

Теоретически определяется, что емкость уединенного шара с радиусом в 1 см, окруженного пустотою, должна быть признана за единицу емкости в CGS-ной электростатической системе. Иными словами, такой шарик, заряженный электростатической единицею электричества, будет иметь потенциал в 300 V. Сокращенно выражаются: единица емкости в CGS электростатической системе есть 1 сантиметр. Отсюда опять можно заключить, какие громадные по-

тенциалы дали бы те количества электричества, которые столь обычны для токов, т.-е. кулоны; один кулон на шарике в 1 см произвел бы потенциал в $3 \cdot 10^9 \cdot 300 = 9 \cdot 10^{11}$ V — никакой бы диэлектрик не выдержал такого напряжения. Земля в пространстве представляет собою тоже уединенный проводник, радиусом в 6000 км, а емкостью в $6 \cdot 10^8$ электростатических единиц емкости. Чрезвычайно сложный вопрос об ее потенциале упрощается тем, что мы все потенциалы измеряем, как разности, считая от земного; а этот последний принимаем за нуль и предполагаем, что изменить его мы не можем никаким способом.

Поэтому разомкнутый генератор, присоединенный к земле одним своим полюсом, будет иметь на этом полюсе устойчивый нуль по потенциала; второй полюс будет заряжен, как конденсатор, вторая обкладка которого есть земля, до потенциала равного эдс генератора.

Соединение двух полюсов с землею равносильно замыканию генератора на внешнюю цепь такого сопротивления, какое представляет собою введенная часть земли. По земле пойдет ток, замыкающийся через генератор; он может быть очень велик, если земля *влажная*; явление приближается к „короткому замыканию“.

Любая точка замкнутой цепи, по которой идет постоянный ток (который мы пока только и рассматривали), может быть соединена

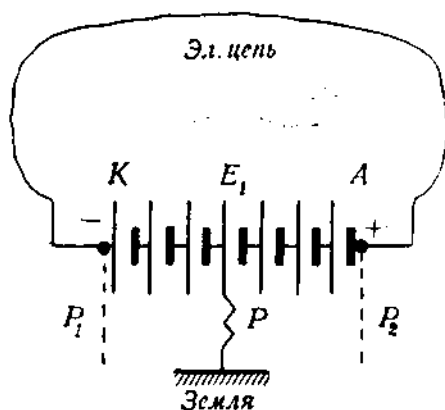


Рис. 90.

с землею; в этой точке будет нулевой потенциал, и в землю токне пойдет. Но если еще и вторая точка присоединена к земле, то введенная часть земли явится ответвлением к проводу между этими двумя точками и возьмет на себя соответственную часть тока или даже будет представлять собою короткое замыкание.

Только соединение с землею какой-либо точки цепи,

например, какой-либо точки генератора, определяет потенциал всех точек цепи. Если мы присоединим к земле проводом p среднюю точку генератора (рис. 90 изображает цепь батареи аккумуляторов с внешнею эдс равною E_1), то только в этом случае один его зажим будет обяза-

тельно (+), а другой (-); по внешней цепи потенциал будет падать от $\left(-\frac{E_1}{2}\right)$ в точке A до $\left(-\frac{E_1}{2}\right)$ в точке K . Если присоединить к земле проводом p_1 „отрицательный“ зажим генератора, то на зажиме A получим $+E_1$, и потенциалы во всей внешней цепи, (как и во внутренней), будут везде положительны, уменьшающиеся от $+E_1$ до нуля.

Заземление зажима A проводом p_2 делает потенциалы всей цепи отрицательными.

При отсутствии заземления потенциалы всех точек цепи случайны и изменчивы; но разности потенциалов, между каждыми двумя точками, конечно, совершенно неизменны, пока по цепи идет постоянный ток.

Электрометры часто градуируются прямо в вольтах; но в основной своей форме они имеют такой простой геометрический вид, что из их показаний вычисляется непосредственно (абсолютно) разность потенциалов в электро-статической системе измерений. С другой стороны, и емкость конденсатора при простейшей геометрической форме может быть определена теоретически тоже в статической системе. Зарядив такой конденсатор до некоторой E , измеряемой абсолютно, мы получим измеренное электростатически количество электричества по формуле

$$Q = CE.$$

Этим способом получаем гораздо более точно измеренное Q , чем прямо по закону Кулона (§ 1).

12. Индукция в разомкнутой цепи. Разомкнутая и вращающаяся динамомашинка, дающая при этом свои вольты, представляет собою частный случай индукции в разомкнутом проводе. Мы видели, что в проводе, пересекающем магнитное поле, индуцируется эдс; если он замкнут цепью, то индуцируется ток; если же он разомкнут, то его концы заряжаются, как объяснено для рис. 87. Этот заряжающий „конденсаторный“ ток пронесет тем большее количество электричества, чем больше емкость концов провода, которая может быть сделана очень большою, если провод заканчивается обкладками конденсатора.

Применив все это к моменту размыкания первичной цепи индукционной катушки (стр. 124 и 129), мы поймем, что в это время на концах вторичной обмотки (предполагаем ее разомкнутой) накапливаются заряды, увеличивается E до того мгновения, когда она может дать искру; если к этим концам присоединен конденсатор C (рис. 91-а),

то мы не можем получить E прежней величины; максимальная искра от катушки будет теперь короче. Яснее всего это представляется, если мы вспомним, что имеем пред собою явление вольтаиндукции

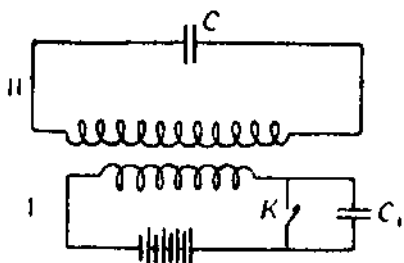


Рис. 91-а.

(стр. 131); весь результат индукции по своей энергии не может превышать энергии того магнитного потока, который образовался пред размыканием. В данном случае этот результат заключается в энергии заряженного конденсатора; следовательно, в лучшем случае во вторичной цепи

$$\text{эн. заряд. конденсат.} = \frac{1}{2} CE^2 = \text{эн. магн. потока.}$$

Так как CE^2 является данной величиной, то, увеличив C , мы получим меньшую E . Если вторичная обмотка замкнута, т.-е. концы ее соединены друг с другом, то E между ними равна нулю; это же самое будет иметь место при C равной бесконечности; следовательно, в данном случае проводник можно отождествить с конденсатором бесконечно большой емкости.

Но следует отметить, что в действительности энергия заряда конденсатора вторичной цепи никогда не может быть равна энергии магнитного потока, так как часть этой последней тратится на явления в первичной цепи — ее ток самоиндукции (а, может-быть, и на паразитные токи в железе). Эти явления прекратятся в самом же начале, если емкость концов первичной обмотки (первичная цепь обязательно разомкнута, так как мы рассматриваем момент размыкания) бесконечно мала; тогда в первое же мгновение эдс самоиндукции будет побеждена электродвижущей силой этого „конденсатора“; но, с другой стороны, с первого же мгновения он будет так сильно заряжен, что у места размыкания появится непрерывный ряд искр, которые и отнимут часть энергии магнитного потока. Такая же потеря энергии будет иметь место, если параллельно месту размыкания K (рис. 91-а), включить бесконечно большую емкость, которая, как мы только что видели, равносильна проводнику и, следовательно, делает возможным развиваться току самоиндукции в полной мере. Из всего сказанного вытекает, что наибольший эффект во вторичной цепи получается при некоторой определенной емкости C^1 , включенной параллельно месту размыкания первичной цепи.

Этот наимыгоднейший конденсатор обыкновенно подбирают пробами; все, что происходит в индукционной катушке, слишком сложно, чтобы могло быть точно учтено; достаточно сказать, что конденсатор первичной цепи после исчезновения магнитного потока разряжается, т.-е. дает обратный ток (электрические колебания), который производит индукцию во вторичной обмотке, при чем все происходящее во вторичной цепи отражается, в свою очередь, и на первичной.

13. Баллистический отсчет. Мы знаем, что равновесие в гальванометре, гальванометрический отсчет имеет место, когда между величиною тока i и углом отклонения подвижной части a удовлетворяется уравнение вида:

$$Ai = Ba, \text{ или } i = Ga$$

(см., напр., стр. 110). Для малых отклонений эта простая зависимость применяется к гальванометру какого бы то ни было устройства. B есть сила, возвращающая подвижную часть (земной магнетизм, упругость нити и т. п.), при $a = 1$; A — сила, электромагнитная, отклоняющая подвижную часть прибора при $i = 1$, G есть „постоянная гальванометра“, численно равная i при $a = 1$.

В виду написанного выше соотношения мы говорим, что гальванометр показывает величину i , так как на нем измеряется электромагнитная сила тока. Но если эта сила действует очень короткое время, то наш прибор своим отклонением измеряет протекшее количество электричества, становясь подобным вольтметру. Такое превращение прибора происходит оттого, что, как учит механика, при кратковременном действии силы происходит удар, а при ударе величиною, определяющего его действие, является не сила, но сила, помноженная на время ее существования, т.-е. импульс силы. Произведение же электромагнитной силы Ai на время представляет собою $A \cdot i \times \text{время} = A \times \text{колич. электричества}$ [форм. (3)], т.-е. пропорционально количеству электричества.

Такое пользование гальванометром называется баллистическим отсчетом.

Когда мы говорили (стр. 166) об электромагнитном измерении заряда какого-либо конденсатора, то и предполагали, что кратковременный ток разряда производит баллистическое отклонение. Теперь мы посмотрим, по какому уравнению определяется этот заряд Q .

Положим, что он стекает чрез гальванометр с одной обкладки конденсатора на другую, за некоторое, очень короткое время t ;

средний ток i равен $Q:t$; средняя электромагнитная сила равна $F=AQ:t$. По закону механики: импульс силы Ft равен количеству движения $m\omega$ ¹⁾ подвижной части, которую он привел в движение; мы получаем

$$AQ = m\omega.$$

Явление представляется таким (как всякое явление удара): импульс электромагнитной силы сообщает подвижной части скорость ω и соответствующую кинетическую энергию так быстро, что она, за все время его действия, не успеет заметно выйти из положения равновесия ($\alpha = 0$). И только тогда, когда сила перестала уже действовать, подвижная часть начинает отклоняться, тратя свою кинетическую энергию на преодоление силы, сопротивляющейся отклонению. Работа против этой силы при отклонении до угла α (баллистический отброс) равна, как это указано в гл. XII § 3, $\frac{1}{2} B\alpha^2$. Следовательно, по закону сохранения энергии,

$$\frac{1}{2} m\omega^2 = \frac{1}{2} B\alpha^2.$$

Из этих двух уравнений получаем, что $Q = \alpha \sqrt{mB} : A$. С другой стороны, если предоставить подвижной части гальванометра без тока колебаться под действием силы (B), возвращающей ее в положение равновесия и инерции ее массы m , то для периода таких колебаний получим:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{B}}.$$

Введя эту величину в предыдущий результат, получаем:

$$Q = G \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot \alpha.$$

Таким образом, Q получается из баллистического отброса, постоянной G , определяемой для того же гальванометра, когда он дает показание a_0 под постоянным током i_0 известной величины $\left(G = \frac{i_0}{a_0}\right)$, и, наконец, T . Для относительного измерения Q нужно лишь α ²⁾

¹⁾ Опускаем механические подробности.

²⁾ Он несколько преуменьшается разными сопротивлениями (затухание); поэтому уловив α , нужно ожидать следующую амплитуду, по другую сторону α_1 , и прибавить к α величину: $\frac{1}{2} (\alpha + \alpha_1)$.

Рис. 91-6 изображает схему измерения заряда конденсатора баллистическим способом. Э изображает генератор, заряжающий конденсатор C (до напряжения равного эдс этого генератора) в тот момент, когда ключ перекинут налево и соединяет точки o и x ; при перекидывании ключа направо мы разряжаем конденсатор чрез гальванометр G . Это измерение легко повторится много

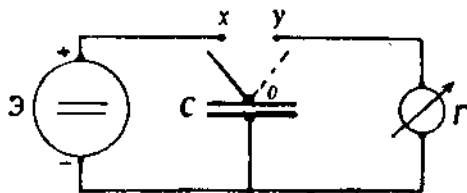


Рис. 91-6.

раз; однако, не смотря на простоту схемы, для получения точного результата приходится принять во внимание много предосторожностей.

Баллистический отсчет служит и для измерения магнитного потока. Для этой цели катушку с n витками, охватывающую поток, быстро вынимают из него, перерезывая его силовые линии. Тогда пройдет средний ток

$$i = n \frac{\Phi}{t} \cdot \frac{1}{R},$$

где R — сопротивление катушки и гальванометра. Отсюда

$$it = Q = \frac{n\Phi}{R}; \quad \Phi = \frac{1}{n} \cdot RQ.$$

На всяком гальванометре может быть сделан баллистический отсчет; но нередко для такого отсчета увеличивают массу его подвижной части; при этом возрастает T , что невыгодно, так как уменьшает α при данном Q , но зато уменьшается значение сопротивлений движению подвижной части; кроме того при большей массе точнее выполняются условия действия мгновенного импульса силы, получается более верный отброс.

ГЛАВА X.

ИСТОРИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ПОНЯТИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТОКЕ.

1. Древняя электростатика. Все наше знание об электричестве выросло из того маленького факта, что потертый янтарь (по-гречески: „электрон“) притягивает к себе легкие предметы. Тайна янтара волновала умы, возбуждала воображение; древние физики приближались к пониманию ее с тою же медленностью и теми же путями, как и к пониманию свойств магнита.¹⁾ В течение тысячелетий, из поколения в поколение передавались сведения о свойствах янтара, действительных и вымышленных. До такой степени мало истинно-нового было прибавлено за весь этот огромный промежуток времени, что еще в XVIII в. полагали, будто не все тела могут быть наэлектризованы трением, т.-е. получить „силу янтара“. Этим свойством, казалось, обладают только смолы, сера, стекло, т.-е. тела, которые мы называем теперь изоляторами; не было идеи о токе, о проводниках, и многочисленные и упорные экспериментаторы того времени не могли понять, что все их старания наэлектризовать трением металлы были неудачны только потому, что образующиеся при трении два электричества тотчас же соединялись через руки экспериментатора, державшего эти проводники.

До какой степени медленно и трудно создаются новые понятия, видно из того, что к пониманию свойства проводимости не привело даже знание обратного свойства — изолировать, т.-е. сохранять заряд, не пропускать его в землю: этим последним уже отлично пользовались, так, например, Ноллэ, помещая человека на скамейку с изолирующими ножками, электризовал его от стекла до такой степени, что мог извлекать из его тела значительные искры.

Изолируя электрический заряд, наблюдатель, кажется, был так близок к идее о проводимости, и все-таки она ускользала от него.

¹⁾ Долгое время электрические и магнитные явления рассматривались, как одно и то же. Гильберт первый стал их понимать отдельно.

Эта древняя наука была чисто электростатическая. Металлы не различались друг от друга, как они и, действительно, не различаются в электростатике; они все были тела, не имеющие электричества; остальные тела назывались „электрическими сами в себе“, так как могли электризоваться от трения. Само электричество представлялось в виде некоего пара или газа, проникающего между частицами тел, стремящегося занять возможно больший объем и образующего своего рода атмосферу вокруг заряженного предмета. Мы встречались с подобным воззрением в истории науки о магнетизме. Проникновением струек этой атмосферы в окружающую среду старались объяснить отталкивание и притяжение легких предметов; для возможности этого проникновения приходилось говорить о „проводимости“ среды, но это была скорее наша „проводимость потоку“, диэлектрическое свойство, чисто электростатическое понятие.

Электричество, как газ, многие ученые отождествляли с теплом, огнем, следуя тогдашнему учению о тепле, как веществе. Это отождествление напрашивалось из наблюдения над электрической искрой, яркой и жгущей, как огонь. Электричество считалось до XVIII в. чем-то одним, потому что явления не были разобраны в подробностях, были смешаны в одном неясном представлении. Франклин указал на противоположность двух различных (стр. 170) электрических состояний, но все же согласовал ее с существованием одного электричества; это была уже унитарная теория. Как мы упоминали выше, после Франклина возникла теория двух электричеств. Она сыграла очень большую роль в развитии понятия об электрическом токе, но в течение первых десятилетий своего существования (вторая половина XVIII в.) и она не сдвинула науку с электростатического направления.

Здесь большое значение имело то обстоятельство, что единственными генераторами того времени были старинные электростатические машины; они легко давали тысячи вольт, но весьма трудно — один кулон; токи от них весьма ничтожны, но зато при сближении их кондукторов, или проводников, ведущих от лейденских банок, заряженных машиною, еще до соприкосновения проводников, проскакивают искры. Что происходит при этом в проводниках — остается незаметным; все внимание обращается на эту искру — место столкновения двух электричеств, или по унитарной теории, место, где выравнивается избыток с недостатком.

2. Тихий разряд. Франклин добивался получить разряд в иной форме, чем искра. То, что он искал, можно охарактеризо-

вать, как стремление разрядить заряд весьма высокого потенциала без помощи искры; только-что мы указывали, что сделать это простым сближением проводов нельзя. Причина, по которой идея о токе проникла таким странным образом, заключалась в практическом складе ума Франклина. Он поднялся до мысли, что молния представляет собою электрическую искру (современная ему наука считала молнию возгоранием серного „элемента“ воздуха). В своем знаменитом опыте с бумажным змеем он убедился, что грозовая туча — заряженное тело. Желая избавить человечество от гибельных последствий грозового удара, Франклин и искал способа произвести разряд тучи в иной форме, чем молния.

Сначала он изобрел прибор, так называемый электрический звонок или маятник: металлический шарик, подвешенный на шелковинке между двумя противоположно наэлектризованными телами, дотронувшись до одного из них и зарядившись от него, притягивался к другому; отчасти разрядив его своим электричеством, заряжался затем об него сам и тогда притягивался к первому и т. д. Происходило медленное и *тихое* разряжение. Эта форма разряда называется переносом электричества.

Затем Франклин открыл свойство острия: проводник теряет свой заряд через заостренные места своей поверхности (где поле, обыкновенно, более напряжено); проводник, снабженный острием, также и всасывает в себя электричество из окружающих его наэлектризованных тел.

Этим то скрытым, самодействующим механизмом острия Франклин и воспользовался для громоотвода, высасывающего электричество из тучи, без помощи искры (молнии). Чтобы она не образовалась и в дальнейшем пути электричества, от накопления его в острие, электричество нужно было отвести в землю.

Для этой цели, острие, поставленное на крыше дома, было соединено с землею металлическим стержнем; так возникла идея о проводнике в самом конце научных занятий Франклина.

3. Гальванизм. В конце XVIII в. Гальвани открыл, что нерв и мышца живого организма наэлектризованы, как обкладки конденсатора. Вольт с большим энтузиазмом приветствовал это открытие, чрезвычайно расширившее наши сведения о животном электричестве: оно было известно до Гальвани, лишь как курьезная особенность электрических скатов и гимнотов. Однако, дальнейшие опыты самого Вольты совершенно отвлекли его от вопросов электрофизиологии, приведя к открытию одного из величайших физи-

ческих явлений: он заметил, что можно произвести сокращение в мускуле живого организма, и не производя соединения таких разнородных элементов, как мускул и нерв, а соединяя металлической проволокой какие-либо две точки, и даже весьма близкие точки, одного и того же нерва. Вольта обратил внимание на то, что это явление происходит особенно резко, если соединяющий проводник состоит из двух различных металлов; он заметил далее, что это различие может не быть химическим, но чисто физическим, в виде хотя бы ничтожной разницы температур, закалки, полировки, блеска соприкасающихся поверхностей; он утверждал, наконец, что достаточно такая разнородность, которую никаким образом нельзя и заметить иначе, чем на сокращении мускула; и во всех опытах Гальвани, даже если соединяющий проводник выбирался сознательно однородным, Вольта предполагал какую-либо внутреннюю неоднородность и усматривал источник заряда не в жизни организма, а в месте прикосновения разнородных веществ. Вместо „животного электричества“ он открыл „металлическое электричество“ (1792 г.).

Металлы были выведены из своей пассивной роли в электростатике и начали выказывать свои характерные особенности, как генераторы электрического состояния. Вольта изобрел элемент, дающий ток продолжительное время; совершился перелом в науке, эпоху статического электричества сменила эпоха электрического тока. Но и сам Вольта еще колебался между этими двумя понятиями: отлично понимая ток, как циркуляцию электричества по замкнутой цепи, он в то же время считал нерв лягушечьей лапки, через которую проходил ток, электроскопом, только особенно чувствительным; тогда как всякий электроскоп есть разомкнутая цепь, а лягушечья лапка являлась совсем другим прибором, который скорее можно назвать гальванометром.

История открытий показывает, что научная мысль работает всегда в двух направлениях; с одной стороны, она стремится подчинить новооткрытое явление тому, что было известно ранее, с другой — наиболее полно выразить все те черты, которые отличают его среди других явлений. Смутное сознание особенности электричества в токе наиболее примитивно выражалось прямо в утверждении, что это есть особое электричество „вольтанческое“. И до последнего времени можно было видеть в учебниках особую главу, называемую „Гальванизмом“, в которой излагалось все то, что отличает динамическое электричество, и прежде всего — его электромагнитное действие.

4. Электричество статическое и ток. Эрстедт, сообщая о своем открытии, говорит о токе, как о „конфликте“ или столкновении двух электричеств; разница между током и тем соударением зарядов, которое происходит в искре, заключается, по Эрстедту, в том, что в токе $(+)$ и $(-)$ электричества, двигаясь навстречу, крутятся одно вокруг другого, описывая винтообразные пути. Это винтовое движение электричества в проводнике и вызывает, по Эрстедту, магнитные вихри вокруг проводника.

В такой сложной форме высказывалась попытка *соединить* понятие об электростатическом стремлении противоположных зарядов друг к другу с понятием о токе, циркулирующем по всей цепи: в замкнутой цепи электричества стремятся друг к другу, но не сталкиваются, ибо все места такой цепи одинаковы, и ни в одной точке ее нельзя предположить того исключительно особого места, где электричества сталкиваются, как в искре; не сталкиваясь, заряды крутятся один относительно другого.

Био и Савар в своем исследовании электромагнитной силы говорят просто о „соединительной проволоке“, действующей на магнит, обходя вопрос о том, что в ней происходит.

Наконец, Ампер говорит о *токе*, об электричествах, *текущих* вдоль проводника, в противоположные стороны, под влиянием тех же сил, которые заставляют два противоположных заряда взаимно притягиваться по прямой линии, соединяющей их. Это понятие текучести особенно хорошо складывается с представлением об электрических *жидкостях*, вошедшим в науку после неосторожного

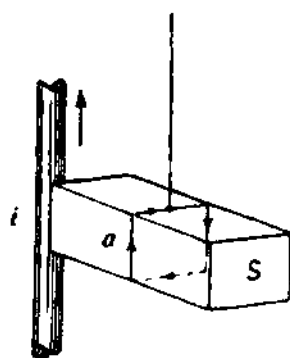


Рис. 92.

введения этого термина Кулоном. Ток течет по проводнику, как вода по каналу, хотя обычный проводник для тока есть сплошное тело, а канал для воды — полый; и если мы заставим ток протекать по полости металлической трубе, то он конечно потечет по толще ее стенок, а не в полости.

Ампер придал понятию о токе такую важность какой не придавал никто не только до Ампера, но и после него; он не признавал магнетизма и все явления электромагнитные и магнитные сводил к токам; его теория заключалась не только в том, что все магниты он считал соленоидами; самую главную ее чертой было отрицание магнитного поля от этих соленоидов; все магнитные

взаимодействия, для Ампера, были взаимодействиями между токами. Так, например, отклонение магнита (рис. 92), под действием прямолинейного тока, по Амперу, есть стремление той части a соленоидального тока, обтекающего „магнит“, в который ток направлен одинаково с i , приблизиться к i .

Доказательство верности своей теории Ампер видел в том, что в ней нет сил „под углом“, которые приходится ввести, если рассматривать действие тока на магнитный полюс; в ней только взаимные притяжения и отталкивания токов, только такие взаимодействия по прямой линии, какие предполагаются в законах Ньютона и Кулона. Ампер так просто, прямолинейно сводил ток к электростатическому притяжению, что не прибегал даже к эрстедтовскому винтообразному пути электричества в проводнике. ¹⁾ Однако, именно с его точки зрения было большою трудностью объяснить факт, который он положил в основу своей теории: два тока одинаково направленных взаимно притягиваются, тогда как текущие в них одноименные электричества, если бы они были в покое, отталкивались бы взаимно.

Большую известность приобрела в свое время (40-ые года XIX в.) попытка Вебера разрешить это противоречие. Вебер ввел изменение или дополнение в закон Кулона для электрических отталкиваний, выражавшее, что взаимное отталкивание двух зарядов зависит не только от их величин и расстояния между ними, но еще и от их скоростей. Эта поправка была введена таким образом, что ничего не изменяла (обращалась в нуль) при скоростях равных нулю; для конечных же скоростей, для электричеств, участвующих в токах, получался закон Ампера взаимодействия токов. Далее Вебер показал, что если из его формулы вывести, как действуют электричества, движущиеся с переменною скоростью, т.е. токи, ²⁾ изменяющиеся по величине, то получается закон индукции (стр. 119). Кроме широты своих применений формула Вебера замечательна тем, что выражает мысль о зависимости взаимодействия от скоростей взаимодействующих тел; если это понимать, как утверждение о распространении самого этого взаимодействия с известною скоростью, то формулу Вебера можно считать промежуточною ступенью между теорией Кулона и максвелловскою (гл. XII § 13). Она ввела понятие о времени распростра-

¹⁾ Как это видно из „правила Ампера“.

нения электростатических действий, игнорируя, однако, место этих воздействий, т.-е. участие среды.

Амперовское отрицание магнитного поля не удержалось в науке; но гениальное представление о постоянном магните, как соленоиде, сохранило все свое значение. Однако, именно, чтобы поддержать его, приходится отказаться от резкого противоположения тока и переноса электричества. Об этом будет упомянуто при изложении электронной теории.

5. Как связать электричество статическое и ток? Современное учение, в духе которого изложена и настоящая книга, ведет свое начало от Ома. Отыскивая причину движения электричества в токе, Ом исходил из опытного факта: каждые две точки проводника, между которыми идет ток, будучи соединены с электроскопами, ¹⁾ дают на них различные показания. Эта разность „электроскопических состояний“ и производит ток; так как электроскопы измеряют потенциалы, то это и есть наша разность потенциалов; она движет электричество, как разность температур движет тепло (см. гл. I § 6).

Теория Ома объясняет ток, не сводя его к электростатическому взаимодействию зарядов, находящихся где-то далеко друг от друга (вероятно, прежние авторы разумели их на полюсах батареи): она говорит, что все сечения проводника с током заряжены до соответственных потенциалов; эти заряды накаплиются, когда ток образуется, начинается, и сходят с проводника если разомкнуть цепь.

Цепь нужно зарядить раньше, чем по ней пойдет ток по закону Ома — это особенно сказывается, если проводники имеют большую емкость, как, например, длинные кабели. Заряды двух соседних частей проводника, имеющих разные потенциалы, немедленно выравниваются; это и есть ток; если он — постоянный, то эти заряды непрерывно восстанавливаются; это последнее делается эдс генератора, которая и рассматривается нами, как первая, главная причина тока.

„Электроскопические состояния“ являются способом, помощью которого эдс генератора производит ток в замкнутой цепи.

Можно на этом представлении и остановиться, так как мы и поступали в предыдущих главах. Недостаток ясности не мешает посредством эдс отлично предсказывать явления.

¹⁾ Вторые обкладки которых (глава IX § 10), предполагается, соединены с землею.

Но можно идти дальше. Истинная теория и развивается, опираясь на опытные данные; какое знаем мы из опыта свойство проводника с током, кроме разности электростатических состояний его различных точек? Это, конечно, — магнитное поле вокруг проводника. Теория тока должна ввести это поле вокруг проводника. Теория тока должна ввести это поле, как необходимое следствие самого понятия о токе. Мы должны понимать необходимость этого поля, необходимость того, что в токе, который идет по проводнику, принимает участие все окружающее пространство, вся среда, окружающая проводник, наполнившаяся магнитным потоком. Первые шаги в создании учения о токе, как электромагнитном явлении, сделал Фарадей.

В общих чертах можно представить дело таким образом: соединим проводником abc обкладки A и B заряженного конденсатора, прикоснувшись концом c к d (рис. 93); электрическое напряжение, бывшее в том месте, которое занято теперь проводником, исчезнет, обращая свою энергию в тепло, так как внутри проводника не может существовать электрическое поле. Тогда в диэлектрике нарушится равновесие боковых расправ, и со всех сторон вокруг проводника, поток будет расширяться, входить в проводник (рис. 94), тотчас же обращаясь в нем в тепловую энергию. Явление прекратится только тогда, когда все поле исчезнет, конденсатор будет разряжен, а проводник эквивалентным образом нагреется, потому что „по нему шел ток“. Все окружающее пространство участвовало в этом явлении, так как чрез него двигалось по направлению к проводнику электрическое поле. И если теперь признать:

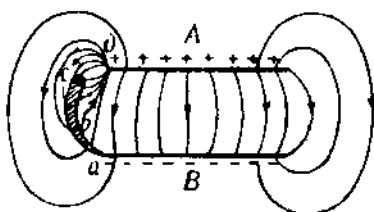


Рис. 93.



Рис. 94.

Положение 1: Когда электростатическое поле движется, то под прямым углом к его направлению и направлению его движения существует (рис. 95) магнитный поток.¹⁾

Если это признать, то магнитные силы вокруг тока вытекают, как необходимость.

¹⁾ Его напряжение пропорционально скорости движения поля.

Действительно, представим себе линии параллельные проводнику (электрич. натяжение), со всех сторон стремящиеся в него; вообразим далее направления, перпендикулярные сразу и к этим линиям, и к их скоростям; (на рис. 94 эти скорости изображены маленькими стрелками); такие перпендикуляры вокруг проводника оказываются касательными к кругам, как магнитные силы, касательные к круговой силовой линии.

Положение 1-ое говорит о каком-то механизме, о неременной связи между движением электрического поля и возникновением магнитного.

Это положение и служит способом связать электричество статическое и ток с его электромагнитными действиями.

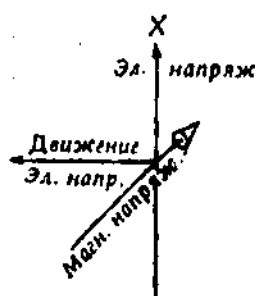


Рис. 95.

Если прежде, чем мы соикнули точку с с точкой d , проскочила искра — это значит, что электрическое поле, быстро переместившись к месту своей наименьшей длины, образовало в этом промежутке такие напряжения, что изолятор не выдержал; в cd в момент искры воздух стал проводником, превращая, как проводник, энергию электрического поля в тепло (рис. 93).

Трудно изобразить всю глубину фарадеевского представления; в нем тончайшим образом связываются статическое поле с электрическим током; джоулево тепло в проводнике не требует для своего объяснения грубых предположений о трении электричества о проводник, как воды о трубу водопровода (гл. XIII, § 13); проводник понимается, как тело пластичное, уступчивое для электрических натяжений, не выдерживающее их сколько-нибудь долгое время, а изолятор, как тело упругое для них; искра — как переход за предел этой упругости.

Что же касается до принципиального допущения необходимого для излагаемой теории, то лучшим его оправданием служит обратное положение.

Положение II: Когда движется магнитный поток, то под прямым углом к его направлению и направлению его движения *существует* (рис. 96) *электростатическое напряжение*. Это электростатическое напряжение пропорционально напряжению магнитного поля и скорости движения потока. Ведь это — точное выражение электромагнитной индукции; если „электростатическое напряжение“

попадет в замкнутую цепь, то и образуется индуктированный ток.

Нужно лишь добавить, что при магнетоиндукции энергия этого тока появляется за счет энергии движения магнитного поля, а при вольтаиндукции — за счет энергии самого магнитного поля (см. гл. VI, § 14).

Эти два положения и заключают в себе все, что мы знаем об электрическом и магнитном потоках.

Относясь к рис. 93, мы представили себе генератор в виде заряженного конденсатора; но если подробно рассмотреть элемент, то мы увидим, что и он состоит из стольких конденсаторов, сколько в нем имеется соприкасающихся поверхностей, заряженных противоположными электричествами; прослойкой в них служит межмолекулярное расстояние между этими поверхностями; разряжаясь чрез цепь, эти конденсаторы непрерывно возобновляют за счет химической энергии свою контактную разность потенциалов.

Что же касается до индукционных генераторов, то их электрическое поле появляется согласно положению второму.

В фарадеевской теории остается объяснить лишь, во-первых, что в обкладках конденсатора (*AB*, рис. 93), не соединенных проводником, удерживает электрическое поле от того, чтобы все его линии сократились до нуля; иными словами, где причина, которая удерживает натяжение в диэлектрике, против его сил упругости? Теория так реальна, что мы должны приступить к ней с этим простым вопросом: мы знаем из обыденной практики, что для того, чтобы понять натяжения в деформированном упругом теле, недостаточно знать, что тело упруго, что оно обнаруживает в этих натяжениях свою упругость, но еще и то, какая внешняя сила уравнивает его силы упругости и удерживает его в деформированном состоянии.

Во-вторых, остается объяснить, каким образом, каким механизмом электрическое поле обращается в металле в тепло; теория Фарадея так много уже рассказывает о том, что такое металл и изолятор, что мы приступаем к ней с вопросом, почему различные металлы под одним и тем же напряжением с различною скоростью разряжают одно и то же поле, т.-е. одно и то же количество электричества; почему они различно проводят?

К ответам на эти вопросы мы приближаемся в теории электронов.



Рис. 96.

ГЛАВА XI.

СЕТЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

1. Генератор переменного тока. Рис. 97 представляет часть якоря, кольцевого типа, машины переменного тока; $N, S, N \dots$ суть полюса электромагнитов, окружающих якорь; эти полюса производят неизменные магнитные потоки, для чего чрез обмотки электро-

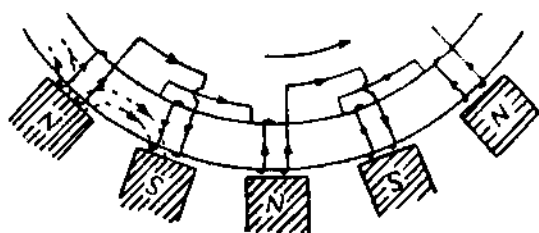


Рис. 97.

магнитов проходит постоянный ток. При вращении якоря в каждой его секции индуцируется соответственный ток; направление обмотки каждой секции обратно направлению

обмоток соседних секций, а так как эти последние пересекают поля противоположных с нею полюсов, то все индуцируемые эдс являются продолжением друг друга и складываются в общую эдс якоря. Обмотка якоря не замкнута на себя (как это делается в динамо постоянн. тока); ее свободные два конца припаяны к двум изолированным кольцам, охватывающим вал якоря, и вращающимся вместе с ним. Ток с якоря собирается обычным образом помощью щеток, нажимающих на кольца, и направляется во внешнюю цепь.

Чрез промежуток времени t_0 , когда при вращении якоря все секции войдут в потоки соседних, т.-е. противоположных, полюсов, эдс во всех секциях переменят свои знаки, и с якоря будет собираться ток противоположного направления.

Таким образом, этот якорь является генератором переменного тока. Периодом переменного тока называется время $T = 2t_0$, за которое ток, два раза переменяя свое направление, получит прежнее

направление. Число периодов за одну секунду называется частотой переменного тока.

Чтобы приводить в действие генератор переменного тока (альтернатор), необходимо, конечно, тратить механическую энергию на вращение якоря, так как в каждый момент индуктируются токи, мешающие его вращению; кроме того необходим еще и генератор постоянного тока, питающий электромагниты.

В настоящее время более употребительны альтернаторы, устроенные по обратной механической схеме: якорь представляет собою внешнее неподвижное кольцо (статор), внутри которого вращается электромагнит со своими полюсами (ротор).

По какому закону изменяется эдс альтернатора, т.-е. сразу ли падает до нуля и затем быстро увеличивается до максимальной величины обратного знака, или изменяется более плавно — все это зависит от характера поля, ¹⁾ даваемого полюсами. Нередко альтернаторы дают электродвижущую силу, изменяющуюся по закону синусов, т.-е.

$$e = E_m \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

E_m обозначает здесь максимальную электродвижущую силу, амплитуду, имеющую место в моменты

$$t = \frac{T}{4}, \frac{3T}{4}, \frac{5T}{4} \text{ и т. д.,}$$

т.-е. чрез каждые пол-периода, когда $\sin 2\pi \frac{t}{T} = 1$.

Генератор переменного тока обозначается на схемах обыкновенно знаком ∞ . При большой частоте употребляется знак $\approx$.

2. Применение альтернаторов. Чрез все приемники электрической энергии, включенные в цепь альтернатора, проходит переменный ток, при чем между двумя токами противоположного направления бывает момент, когда не идет никакого тока (когда секции якоря находятся как раз между полюсами $N, S, N \dots$ рис. 97).

Для световых приемников направление тока, вообще говоря, не имеет значения; но все лампы накаливания, а особенно — вольтовые

¹⁾ Поток каждого полюса, напр., N разделяется на две прибл. равные части, которые, зайдя в железо якорного сердечника, входят затем в два соседние полюса, одна половина в S , расположенный направо от N , другая — налево.

дуги притухают в моменты отсутствия тока; ¹⁾ отсюда происходит мигание света. Однако, если это мигание очень часто, то глаз его не замечает; глаз сохраняет свое впечатление в течение прибл. 0,1 сек; если перемены тока происходят чаще, чем через 0,1 сек., то освещение переменным током ничем на глаз не отличается от освещения током постоянным. ²⁾

У нас на практике применяется переменный ток с периодом, $T = \frac{1}{50} \text{ сек}$ (частота $50 \frac{\text{пер}}{\text{сек}}$), т.-е. со ста переменами в сек.

Что касается до электродвигателей, то существует множество конструкций этих приборов, позволяющих питать их переменным током.

Но переменным током нельзя производить электролиза: во вторую половину периода, когда ток переменит свое направление, обратная химическая реакция уничтожит все, что было произведено за первую половину. Переменным током нельзя, например, заряжать аккумуляторы без особых приспособлений, называемых выпрямителями тока.

3. Передача энергии переменным током; трансформатор. Переменный ток имеет большие преимущества в сравнении с постоянным при передаче энергии на большие расстояния. Мы знаем, что при всякой передаче энергии происходит потеря энергии в передающей линии вследствие выделяемого в ней джоулева тепла, величиною $i^2 r$ за каждую сек. Сопротивление r магистралей большой длины по необходимости велико, так как пришлось бы затратить огромное количество меди, чтобы придать малое сопротивление проводнику в несколько десятков или сотен км длиной. При этом большие сети, по самому смыслу своему, должны быть рассчитываемы на большое потребление, т.-е. большой ток i ; квадрат которого и определяет величину джоулева нагревания при данном r . Таким образом, в большой установке потеря энергии в проводах весьма значительна.

Переменный ток позволяет уменьшить потери в линии помощью трансформации электрической энергии. Сущность этой трансфор-

¹⁾ Однако условия горения дуги настолько еще сохраняются, что дуга загорается вновь без необходимости сдвигать угли.

²⁾ Переменность можно заметить только при наблюдении быстро движущихся предметов. В вольтовой дуге переменного тока, разумеется, уже не образуется двух полюсов разного характера; не образуется особенно яркого кратера; оба угля сгорают одинаково.

мации заключается в следующем: вместо того, чтобы пускать по линии ток i , который нужен для приемников, и под тем напряжением E , на которое построены приемные приборы, можно по линии провести ту же мощность Ei под видом меньшего тока i_0 , но под соответственно большим напряжением E_0 , удовлетворяющим равенству

$$E_0 i_0 = Ei.$$

Если $i = 500$ A, $E = 100$ V, а $i_0 = 5$ A, то $E_0 = 10\,000$ V; в этом случае потеря энергии в линии за 1 сек уменьшится в десять тысяч ($i_0 = 0,01 i$) раз.

Для выполнения такой схемы остается лишь разрешить вопрос, каким образом трансформировать электр. мощность $E_0 i_0$ в Ei при входе ее в приемники. Для переменного тока задача решается просто.

Трансформатор п. т. (переменного тока) это две катушки, связанные взаимною индукцией (рис. 52 или 56); когда по одной из них проходит ток, меняющий свое направление, возбуждающий переменное магнитное поле, то в каждом витке другой все время возбуждается индуктированная эдс. Вся вторичная обмотка является генератором тем большей эдс, чем больше в ней витков. Выбрав должное число вторичных витков, мы можем получить желаемое напряжение во вторичной цепи. Мы видим, что трансформатор п. т. тем отличается от индукционной катушки, что не требует никакого прерывателя. Вообще в нем нет движущихся частей, следовательно, нет потери на трение, и его отдача обыкновенно превосходит 90%.

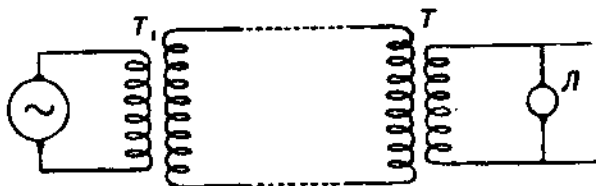


Рис. 98.

Трансформирование энергии переменным током производится по такой схеме: ток высокого напряжения и малой величины идет по линии; он проходит по первичной обмотке трансформатора T (рис. 98); перемены тока в первичной обмотке вызывают изменение магнитного поля в сердечнике трансформатора; вследствие этого в каждом витке вторичной обмотки индуктируется соотв. эдс. Если

подобрать должное число этих витков, то во вторичной обмотке получается ток обычного напряжения; этот последний проходит через приемники L . Если альтернатор G на станции дает меньшее число вольт, чем должно быть в линии, то при нем ставится второй трансформатор T_1 , повышающий вольты: его первичная обмотка питается непосредственно от альтернатора, а вторичная, имеющая достаточно большое число витков, служит генератором высокого напряжения в линии.

4. Измерительные приборы. На практике, измерения в цепи п. т. производятся тепловыми и электродинамическими приборами.

В тепловых приборах движение указателя не зависит от направления тока, так как им указывается лишь расширение проволоочки от джоулева нагревания. Это нагревание изменяется от момента к моменту, так как непрерывно изменяется величина тока; прибор дает некоторое неподвижное показание, соответствующее постоянному, среднему нагреванию, и переменный ток считается величиною в 1 А, если он производит на тепловом приборе то же показание, что постоянный ток, равный 1 амперу.

Взаимодействие и отклонение катушек в электродинамометре (рис. 46) тоже будет происходить в одну и ту же сторону за весь период переменного тока, так как изменение направления тока происходит в обеих катушках одновременно. Сила этого взаимодействия будет, конечно, изменяться при изменении величины тока; прибор показывает некоторое среднее, постоянное взаимодействие, т.-е. измеряет такой ток, который, будучи постоянным, производил бы в приборе такое же отклонение.

Все эти замечания вполне относятся и к вольтметру (могущему также быть тепловым или электродинамическим), и к ваттметру переменного тока.

Ни на одном из этих приборов мы не можем измерить максимальных величин E_m или J_m , до которых поднимается напряжение или ток в цепи. Если e синусоидально (стр. 199), и такой же закон управляет изменением i , т.-е.

$$i = J_m \sin 2\pi \frac{t}{T},$$

то, как показывает теория, приборы дают эффективное e и эффективное i , выражаемые через максимальные величины таким образом:

$$E = \text{эффект. } e = \frac{E_m}{\sqrt{2}}; \quad J = \text{эффект. } i = \frac{J_m}{\sqrt{2}};$$

в этом случае легко узнать, по показаниям приборов, максимальные величины E_m и J_m умножением E и J на $\sqrt{2}$. В дальнейшем мы будем разумеать под током и напряжением в цепи п. т. эффективные величины, J и E .

Б. Особые явления, характеризующие сеть переменного тока. В проводниках, находящихся вблизи сети п. т. и параллельных ее проводам, индуктируются эдс; это наблюдается, например, в телефонных проводах, если они неправильно расположены около осветительной сети п. т. Это вполне объясняется тем, что вокруг провода с переменным током то возникает, то исчезает магнитное поле, перерезывающее при своем движении окружающие провода.

Если это поле достаточно сильно, например, происходит от электромагнита, поток которого замыкается через воздух, то в проводящих контурах, охватывающих этот поток, индуктируются достаточно сильные токи, чтобы зажечь лампу, произвести электродинамическое взаимодействие; такие явления наводят на мысль о возможности передавать энергию на расстояние без проводов, но, в сущности, это — не что иное, как взаимная индукция, действующая и в обыкновенном трансформаторе п. т., в котором обе обмотки связаны также лишь магнитным потоком.

Вследствие того, что поле переменное, во всех частях сети п. т., где есть самоиндукция, обнаруживается ее действие: эта электромагнитная инерция не позволяет току увеличиваться в тот же момент, как начинают увеличиваться вольты, и уменьшаться в точности с того момента, когда вольты стали уменьшаться. Переменный ток опаздывает от вольт, которые его производят. Та же инерция еще и уменьшает эффективную величину тока. Чтобы подойти к этому явлению с простой, механической стороны, достаточно посмотреть на обычный гальванометр постоянного тока, например, с магнитной стрелкою, включенный в цепь п. т. По его обмотке проходит достаточный, и, может-быть, даже чрезмерно большой ток, но его стрелка остается видимо неподвижной; вследствие своей инерции она не успевает заметно отклоняться 100 раз в секунду то в одну сторону, то в другую; амплитуда ее колебаний остается незаметною, хотя электромагнитные силы, прилагаемые к ее концам, совершенно достаточны, чтобы отклонить ее, если бы только они действовали не так кратковременно и притом не меняли бы так часто своего направления на обратное; необходимо микроскопическое увеличение, чтобы заметить колебания с такой малой амплитудой. В пределе, при бесконечной самоиндукции, по цепи совсем не может идти переменный ток, как нельзя,

например, раскачать землю, прыгая по ней. (О резонансе см. гл. XII.)

Самойндукция определяется магнитной проницаемостью среды, окружающей проводник; поэтому величина тока в цепи альтернатора определяется не только сопротивлением проводов, но и свойствами среды; стоит только в катушку, обтекаемую переменным током, вставить железный сердечник, ток в цепи упадет, как будто введено большое сопротивление. Такие катушки служат, подобно реостатам в цепи постоянного тока, способом уменьшить ток в сети альтернатора; они называются реактивными катушками или дросселями. Они выгоднее реостатов, так как действуют не тем, что поглощают энергию своим джоулевым нагреванием, но тем, что не допускают току достигать большой величины; энергия альтернатора не может войти в ту цепь, где включена реактивная катушка, в большем количестве, чем позволяет самоиндукция или „инерция“ катушки.

Особенностью цепи п. т. служит еще то, что конденсатор, включенный в нее (рис. 99), не размыкает цепи. Генератор постоянного тока при такой схеме может дать только кратковременный ток, заряжающий конденсатор до напряжения генератора; в цепи окажутся тогда две противоположных и равных эдс, и ток прекратится

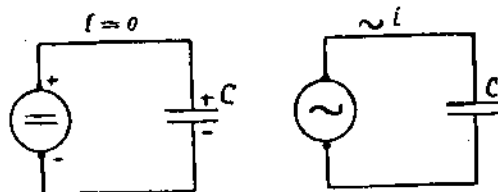


Рис. 99.

(ср. IX, § 9 и 12). Но альтернатор будет непрерывно давать ток: то заряжая конденсатор, то разряжая его, то перезаряжая, когда его собственная эдс сменится на обратную. Чем больше емкость конденсатора, тем больший ток пойдет на него при зарядке и с него при разряде, т.-е. больший ток будет идти вообще по цепи.

Далее замечательной особенностью цепи п. т. является то, что ее ватты могут быть не равны, но меньше произведения I и E , отсчитанных на амперметре и вольтметре (включенном у зажимов альтернатора, рис. 100). Объяснение этого для случая замкнутой цепи п. т. — все в той же самоиндукции: альтернатор дает энергию на джоулево тепло и на образование поля вокруг проводников за ту часть периода, когда это поле возникает и увеличивается; за ту же часть периода, когда поле исчезает и отдает цепи свою энергию, часть энергии тока получается за счет исчезающего потока; в эти

момента цепь сама является своим генератором, возвращает энергию, запасенную в ней в виде магнитного потока. Поэтому мы делаем ошибку, приписывая весь эффективный ток, даваемый амперметром, электродвижущей силе между точками *a* и *b*; мы считаем за генератором слишком большие ватты, помножая *J* на *E*₁.

Замечательно, что ваттметр этой ошибки не делает: в нем автоматически вычитается из его показания взаимодействие его катушек за те моменты, когда

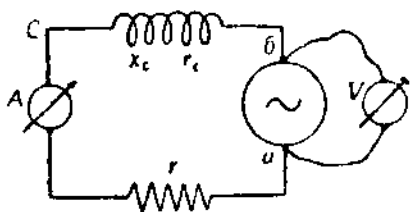


Рис. 100.

цепь питается током от эдс самоиндукции, так как в эти моменты *i* не соответствует *E*₁ альтернатора, и катушки взаимодействуют в обратную сторону. Ваттметр дает в этом случае действительные ватты, даваемые генератором, меньшие произведения показаний амперметра и вольтметра, т.-е. дает:

$$P \text{ ватт} < (E_1 J) \text{ вольт} \times \text{амперы.}$$

Совершенно подобные явления происходят и в разомкнутой цепи п. т., когда в ней имеется конденсатор, который, разряжаясь, отдает энергию, данную ему при зарядке альтернатором.

Все описанные явления зависят от переменности тока; поэтому, чем период *T* больше, чем ближе ток к постоянному, тем они менее заметны. И наоборот, чем период меньше, частота больше, тем все явления становятся более заметны. При тех частотах, какие применяются в радиотехнике, доходящих до сотен тысяч и миллионов периодов в секунду, один виток проволоки и даже кусочек прямолинейного провода обнаруживают очень резко свою самоиндукцию; они образуют очень слабое магнитное поле, но оно так быстро меняется, что возбуждает большие эдс как в самих этих проводниках, так и в окружающих проводах. С другой стороны, при таких больших частотах, если цепь разомкнута, самый маленький конденсатор легко проходим для тока.

Все вышесказанное можно резюмировать таким образом: самоиндукция представляет собою препятствие, „сопротивление“ переменному току, которое возрастает не только с увеличением коэффициента самоиндукции *L*, но и с увеличением частоты $\nu = \frac{1}{T}$; оно пропорционально произведению *Lν*. Емкость же дает проводимость

цепи переменного тока, пропорциональную Cv ; сопротивление емкости, следовательно, пропорционально обратной величине, $\frac{1}{Cv}$.

6. Гистерезис. Все железные сердечники в цепи п. т. нагреваются; во всей их массе, за все время, пока идет ток, выделяется тепло. Отчасти это происходит от паразитных токов в железе (стр. 130); эту часть нагревания можно уменьшить подразделением железа. Но частью нагревание происходит от другой причины, которую нельзя ослабить: железо, размагничиваясь, не отдает *всей* энергии, потраченной на его намагничивание; разность этих энергий, появляющаяся за каждый цикл намагничивания (период тока), остается в железе в виде тепла. Это свойство железа называется гистерезисом.

Заметим, что в железе якоря динамомашин и электродвигателя, каждая точка которого за время полного оборота намагничивается, размагничивается и перемагничивается — также происходит потеря на гистерезис, складывающаяся с потерями на токи Фуко и паразитные токи.

В сердечнике трансформатора п. т., а также реактивной катушки всегда происходят потери на гистерезис и паразитные токи.

7. Геометрический способ изображения. Сначала обратимся к цепи постоянного тока. Изобразим внешнюю эдс, производимую генератором постоянного тока, отрезком AB (рис. 101) прямой линии, длина которого выражает *вольты* E_1 в соответственном масштабе. Обозначим на этом отрезке направление от A к B ; обратную эдс будет изображать отрезок (*вектор*), направленный обратно. Если в цепи действует еще и обратная эдс какого-либо нетеплового приемника (стр. 148 и 155), то мы должны будем из AB вычесть эдс (BC). Остаток AC , который получается после этого вычитания, представляет собою ту часть эдс генератора, которая идет целиком на нагревание. Ток идет под эту эдс (AC); по закону Ома $AC = RJ$, где R — сопротивление внешней цепи, J — ток, текущий по ней.

Ватты в цепи равны, по нашим основным положениям, вольтажу во внешней цепи (у зажимов генератора), помноженному на ток, т.-е.

$$P_1 = AB \cdot J.$$

Эти ватты, даваемые генератором, распадаются: на 1) ватты, поглощаемые нетепловым приемником,

$$CB \cdot J;$$

и 2) ватты, поглощаемые тепловым приемником,

$$AC \cdot J;$$

$$P_1 = AC \cdot J + CB \cdot J = AB \cdot J.$$

Если мы говорим: „вольты CB “, то мы имеем в виду ту часть эдс генератора, которая преодолевает вольты нетеплового приемника, равные „ BC “ (обратно направлены); точно также можно говорить об обратной эдс и теплового приемника (CA), на преодоление которой генератор дает вольты „ AC “.

Ток J при геометрическом изображении также представляется в виде вектора определенного направления и определенной длины (в шкале амперов). Пусть AJ изображает этот ток.

Чтобы простое умножение вольт на амперы было и геометрическим умножением, необходимо, чтобы вектор AJ совпадал по своему направлению с вектором вольт (рис. 101).

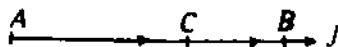


Рис. 101.

В цепи переменного тока дело обстоит иначе: здесь, как мы видели, могут быть „приемники“, отдающие, отчасти, энергию назад. Будем называть „самоиндукцией“ и „емкостью“ такую катушку и такой конденсатор, которые не оставляют в себе нисколько энергии; их провода не должны иметь никакого заметного сопротивления; в катушке не должно быть железа; диэлектрик конденсатора должен быть идеальным изолятором, не обладающим проводимостью („без утечки“) и не обладающим диэлектрическим гистерезисом.

Такие идеальные самоиндукция и емкость не поглощают никакой мощности; самое название „приемники“ применимо к ним только в обобщенном смысле этого слова, они — приемники в том смысле, что вводят в цепь от себя некоторую эдс (как заряженный конденсатор или катушка, внутри которой меняется магнитное поле). Эта эдс не может быть направлена при геометрическом изображении напротив тока, так как тогда, по предыдущему, она изображала бы приемник, поглощающий ватты, и, конечно, не может быть направлена по вектору тока, так как тогда она изображала бы предмет, дающий мощность в цепи, второй генератор. Следовательно, эдс идеальных самоиндукции и емкости должна изображаться вектором перпендикулярным ¹⁾ току (на рис. 102 DC — эдс самоиндукции,

¹⁾ Если бы этот вектор был наклонным к току, то он свою проекцию давал бы вектор по току или против него, что, как мы сказали, должно быть исключено.

FC — эдс емкости). По законам геометрического умножения геометрическое произведение таких векторов на J равно

$$CD \times J \cdot \cos 90^\circ = 0; \quad CF \times J \cdot \cos 90^\circ = 0.$$

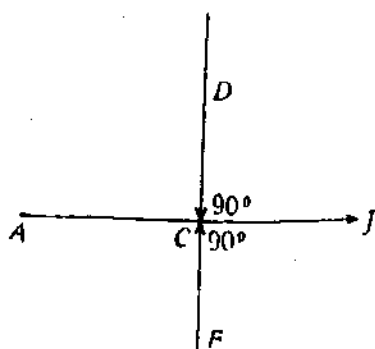


Рис. 102.

Если в цепи имеется еще и чисто тепловой приемник, поглощающий немедленно всю мощность, проходящую чрез него и ничего не отдающий обратно, т.-е. так называемое „чисто омическое сопротивление“, то его обратная эдс будет направлена прямо против тока, как и в цепи постоянного тока; по нему ток идет по закону Ома. Пусть CA (рис. 102) представляет эдс этого приемника;

тогда AC изображает ту часть эдс генератора, которая ложится на чисто омическое сопротивление.

8. Полное сопротивление. Сложим векторы DC и FC в один KC (рис. 103), направленный в данном случае вниз; для побеждения этой эдс генератор должен дать эдс CK .

В общем, генератор должен дать цепи эдс, представляемую геометрической суммой векторов AC и CK , т.-е. его эдс во внешней цепи изображается вектором $E_1 = AK$. По закону Ома $AC = rJ$; подобно этому $CK = xJ$; это x также называется сопротивлением, но так как оно представляет собою сопротивление приемника, поглощающего мощность, то его называют сопротивлением безваттным.

Из треугольника AKC имеем:

$$AK = J\sqrt{r^2 + x^2}, \text{ или } J = \frac{E_1}{\sqrt{r^2 + x^2}};$$

последнее выражение соответствует тому факту, что в случае присутствия самоиндукции и емкости в цепи имеется сопротивление z , состоящее из омического r и еще второго, x , неомического, которое тоже уменьшает ток:

$$z = \sqrt{r^2 + x^2};$$

z называется *полным* сопротивлением; зная его, можно найти ток, опять-таки, по формуле аналогичной закону Ома:

$$J = \frac{E_1}{z}.$$

Без вывода сообщаем, что безваттное сопротивление самоиндукции

$$x_c = L\omega,$$

где L обозначает коэффициент самоиндукции, $\omega = 2\pi/T$ так называемая угловая скорость переменного тока, или частота в 2π секунд; безваттное сопротивление емкости

$$x_c = -\frac{1}{C\omega},$$

где C — емкость конденсатора. Разными знаками при x_c и x_e , выражаются противоположные роли этих сопротивлений: L мешает току, тогда как C помогает ему.

$$x = \omega \left(L - \frac{1}{C\omega^2} \right).$$

Мы видим, что полное безваттное сопротивление может быть равно нулю при совместном существовании L и C ; для этого необходимо лишь выполнение условия

$$L - \frac{1}{C\omega^2} = 0,$$

или

$$T = 2\pi\sqrt{LC};$$

как увидим ниже, это условие выражает, что цепь находится в резонансе с периодом генератора.

Омическое сопротивление r может быть сопротивлением отдельного реостата без емкости и самоиндукции, но может заключать в себе и сопротивление катушки самоиндукции и потери в конденсаторе.

Следовательно, говоря об идеальных емкости и самоиндукции, мы не говорим о чем-то невозможном в действительности, а лишь выделяем непоглощающий мощность приемник, относя его свойство поглощать мощность к общему r цепи.

Выражения для x показывают, что, чем больше L , тем большее препятствие испытывает ток; увеличение C , наоборот, помогает току; $C = \infty$ оставляет в цепи только омическое сопротивление (конденсатор нет, ср. стр. 184).

Уменьшение периода T , увеличение ω усиливает значение и L , и C , так что при очень быстрых переменах тока малая самоиндукция представляет уже большое препятствие, а конденсатор даже и с малою C хорошо пропускает ток.

Так, например, при $T = 1/10000$ ($\omega =$ прил. 60 000) сопротивление самоиндукции при небольшом $L = 10^{-3}$ генри $x_c = 60 \Omega$, а при небольшой емкости $C = 10^{-6}$ фарады $x_c = 26,5 \Omega$.

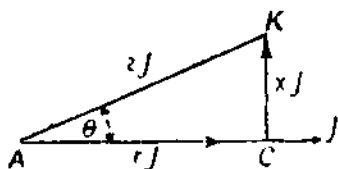


Рис. 103.

9. Фазовый угол. Рис. 103 построен нами так, как будто наперед были заданы J , r , x . Рис. дает возможность узнать необходимую для данного J и данных постоянных цепи эдс генератора в цепи; она оказалась равною AK , выраженной

в шкале вольтов. Мощность, которую выделяет этот генератор, мы получим из выражения:

$$P_1 = J^2 r = \overline{AC} \cdot J;$$

ее можно выразить через внешние вольты генератора:

$$P_1 = AK \cdot \cos \varphi \cdot J, \quad ^1)$$

так как AC есть проекция AK на направление J . Мы опять видим (ср. § 5), что ватты в цепи переменного тока не равны, вообще говоря, произведению вольт на амперы. Угол φ называется фазовым углом данной цепи переменного тока. Он может быть заранее предвычислен по данным цепи из выражения:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r}.$$

Фазовый угол тем больше, чем больше отношение x к r . Фазовый угол можно уменьшать увеличением сопротивления r .

Не должно думать, что угол φ во всех участках цепи один и тот же; обратимся для примера к цепи, изображенной на рис. 100; дадим ей геометрическое изображение (рис. 104): перпендикулярно вектору тока строим xJ ; здесь $x = L\omega$, так как схема рис. 100 не заключает в себе емкости; по вектору тока откладываем $CN = r_c J$,

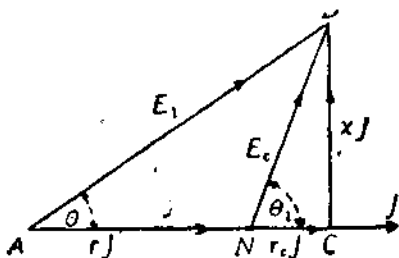


Рис. 104.

где r_c означает ваттное сопротивление нашей катушки самоиндук-

¹⁾ На рис. 103 угол φ обозначен буквою θ .

ции; равнодействующая этих двух эдс, ND образует фазовый угол φ_1 ¹⁾ (вольтметр, приключенный к концам $Cб$ этого участка цепи, покажет величину ND); под таким большим углом к J находится та часть эдс генератора, которая побеждает самоиндукцию и ее сопротивление. Если катушка с самоиндукцией не имеет заметного сопротивления („идеальная самоиндукция“), $r_c = 0$, то угол $\varphi_1 = 90^\circ$, и $E_c = xJ$. Вольты, побеждающие омическое сопротивление r , включенное вне самоиндукции, выражаются отрезком AN ; здесь фазовый угол $= 0$. И, наконец, полные вольты во внешней цепи, геометрическая сумма векторов AN и ND , будут изображаться отрезком AD , образующим угол φ с вектором тока; их будет измерять вольтметр, включенный, как показано на рис. 100.

Мы берем за основу наших диаграмм J , потому что в цепи переменного тока без разветвлений чрез все сечения, в каждый момент идет один и тот же ток, как и в цепи постоянного тока; тепловой амперметр, включенный где-либо в такой цепи, покажет одно и то же J ; также безразлично, куда включить амперную обмотку ваттметра; что касается до его вольтовой обмотки, то если ее приключить к концам самоиндукции, $б$ и $С$, ваттметр покажет ватты $ND \cdot J \cdot \cos \varphi_1$; если же ее приключить к омическому сопротивлению Ca , ваттметр покажет $AN \cdot J$; наконец, ваттметр, приключенный своею вольтвою обмоткою к точкам a и $б$, покажет $E_1 \cdot J \cdot \cos \varphi$.

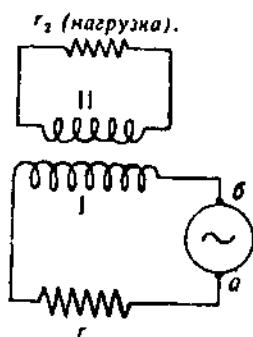


Рис. 105.

10. Нагрузка трансформатора. Теперь предположим, что соленоид $бс$ (рис. 100) снабжен вторичной обмоткой, т.-е. представляет собою трансформатор (рис. 105). Пока эта обмотка разомкнута, при чем ее концы представляют ничтожную для данной частоты емкость (C_{ω} очень мало), трансформатор не нагружен, вторичную обмотку можно считать практически несуществующею, и все явления происходят по схеме, описанной в предыд. параграфе (случай дросселя).

Но, как только трансформатор нагружен (хотя бы заметной емкостью), энергия генератора частью своею переходит в замкнутую теперь вторичную обмотку, и дело представляется несколько иначе. Попрежнему эдс E_1 , действующая в первичной цепи ab , распада-

¹⁾ На рис. 104 углы φ и φ_1 обозначены буквами θ и θ_1 .

дается на две составляющие, из которых одна не участвует в выделении энергии, другая же является единственной причиной этого выделения.

Но в данном случае энергия идет не исключительно на нагревание сопротивлений r и r_c , но еще и на вторичную цепь. При измерениях это выражается в том, что $NC > r_c J$; та эдс, которая

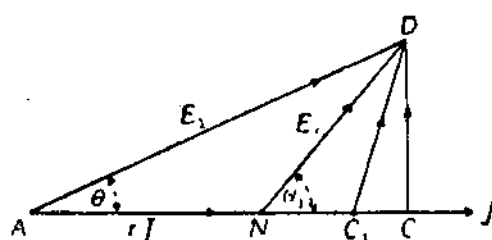


Рис. 106.

идет на соприкосновение первичной обмотки, выражается некоторым отрезком $NC_1 = r_c J$ (рис. 106).

Мощность $C_1 C \cdot J$ должна быть признана переходящею во вторичную цепь.

При нагруженном трансформаторе не AC определяет величину тока в первичной цепи ab , не AC делится в отношении $r:r_c$; все это нужно отнести к AC_1 , меньшей, чем AC . Отложив на AC вольты $AN = rJ$, а затем NC_1 , мы получим остаток $C_1 C$.

11. Электрификация. Электрическая энергия различными способами, без особых затруднений, получается из других видов энергии. Кпд такого преобразования энергии может быть очень высоким: Электрическая энергия посылается на большие расстояния, распределяется между приемниками, регулируется по своей мощности; все это делается очень быстро, удобно и учитывается на электроизмерительных приборах с большою точностью и нередко — автоматически. При самой передаче электрической энергии, даже на огромные расстояния, если применяется достаточно высокое напряжение, потери в линии, в проводах оказываются незначительными. Кпд передачи достигает высокого значения.

Электрическая энергия может быть запасема, сохраняема и тоже — с немалым кпд.

Все это, вместе взятое, делает электрическую энергию чрезвычайно важною, как бы — предназначенною, для того механического оборудования нашей жизни, без которого человечество не может жить культурно. Это механическое оборудование требует питания машин энергиею. Источниками питающей энергии служат, с одной стороны, горючее (уголь, торф, дрова, нефть), с другой — те «вечные двигатели», которые дает нам природа (текущая вода, ветер, свет солнца, приливы — отливы). Жизнь создает много сложных усло-

вий, вследствие которых очень часто потребление энергии не совпадает ни по своему месту, ни по своему времени с источником энергии.

Вследствие несовпадения по месту, при механической передаче энергии без помощи электричества приходится горячее возить к месту потребления, причем нередко продукты сгорания приходится убирать, вывозить, ибо вещество, которое служит нам только, как горючее, не нужно само по себе; нужна только его энергия; или, как второе решение вопроса, приходится потребителя энергии, против удобств и требований жизни, переселять к месту нахождения источника энергии.

Вследствие несовпадения по времени приемнику энергии приходится работать не во-время, искажая условия жизни.

Электрическая передача энергии устраняет все это. Электрифицированная страна — та, в которой подача энергии, питающей машины, производится без ненужных затрат, всегда во-время, наиболее дешево и без малейших насилий над условиями жизни. Жизнь при электрификации становится, по новому, легкой, естественной, разумно исчерпывающей все энергетические ресурсы, которые даны природою.

Для выполнения электрифицирующей схемы требуется, с одной стороны, точный учет залежей питающей энергии и точное знание всех капризов работы естественных двигателей; с другой стороны — наиболее полное знание свойств электрической энергии. Всякий новый успех в науке об электричестве ведет к дальнейшим возможностям на пути электрификации.

Уже теперь можно предвидеть, что ближайшею новою эпохою в деле передачи электрической энергии будет использование тех ее свойств, вследствие которых она может передаваться в виде лучей без проводов. Этому явлению посвящается дальнейшее изложение.

ГЛАВА XII.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ.

1. Сила упругости. Объяснение электрических колебаний может быть дано по аналогии с теорией колебаний упругих тел; с этою последнею мы и должны прежде всего ознакомиться.

Упругим телом называется такое, в котором, если оно деформировано, обнаруживается сила, стремящаяся возвратить его к прежней форме.

Эта сила называется силою упругости. Она зависит от вещества деформируемого тела и его физических условий (напр., температуры), от характера деформации (растяжение или скручивание и т. п.) и от ее величины. Относительно этой последней зависимости для небольших деформаций принимается, что сила упругости пропорциональна величине деформации, т. е.

$$F = -k \cdot \alpha, \quad (29)$$

где F означает силу упругости, α — величину деформации, k — постоянная упругости ¹⁾ для данного вида деформации и для данного тела при неизменных физических условиях его.

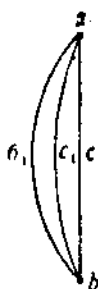


Рис. 107.

Если струну, закрепленную в двух ее концах a и b (рис. 107), оттянем в положение $a_1c_1b_1$ и затем предоставим ее самой себе (удалим деформирующую силу), то сила упругости вернет ее к прежней форме acb .

Если той же струне acb сообщить вдвое большую деформацию того же вида, то явление будет отличаться только тем, что сила упругости будет вдвое большая [форм. (29)]; она придаст струне вдвое большее ускорение, и струна будет двигаться к положению acb со скоростями вдвое большими;

¹⁾ Называемая „модулем упругости“.

а так как и путь для каждой ее точки предстоит теперь вдвое больший, то она совершит свое возвращение к нормальной форме за то же время, что и из ac_1b .

Получается замечательное положение: упругое тело возвращается к нормальной форме за одно и то же время при всякой величине деформации, какую бы ему ни сообщили; лишь бы эти деформации были одного типа, и физические условия оставались постоянными; в противном случае формула (29) с постоянным k , на которой мы основывались, не может иметь места.

2. Гармонические колебания. Явления, которые происходят в упругом деформированном теле после того, как оно предоставлено самому себе, не ограничиваются возвращением тела к нормальной форме. Мы должны помнить, что всякое движение подчиняется закону инерции; все элементы струны, пришедшей в положение acb , стремятся продолжать свое движение; она перейдет через нормальное положение и, деформируя саму себя, прогнется в обратную сторону до положения, например, ac_2b (рис. 108). После этого произойдет явление, объясненное в § 1, только в обратном направлении (справа налево); затем по инерции струна примет положение ac_1b и т. д.

Таким образом, в деформированном упругом теле, предоставленном самому себе, происходят колебания в обе стороны около его нормальной формы. Эти колебания называются гармоническими.

Промежуток времени, за который средняя точка опишет путь cc_1cc_2c , т. е. два раза пройдет положение равновесия, называется периодом колебания; будем обозначать его буквою T . Число периодов за одну секунду называется частотой колебаний. Частоту будем обозначать, как и выше обозначали, греческой буквой ν („ню“).

Наибольшие деформации, испытываемые, телом в ту или другую сторону от нормального положения, называются амплитудами колебания. На рис. 108 левая амплитуда точки c равна cc_1 .

3. Сохранение амплитуды. С точки зрения сохранения энергии дело представляется следующим образом: отогнув струну до ac_1b (рис. 108), мы затратили на нее известную работу W_1 , придали телу известную энергию (стр. 10) (потенциальная энергия деформированного тела) равную W_1 . Когда тело возвращается в нормальное положение,

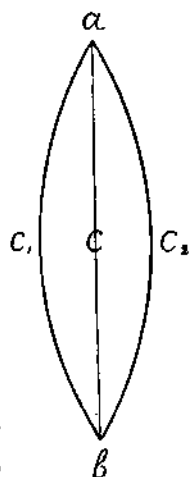


Рис. 108.

его деформация исчезает, его потенциальная энергия мало-по-малу пропадает, зато все увеличивается его живая сила (тело движется ускоренно). В положении acb нет уже потенциальной энергии, кинетическая же, $\frac{mv^2}{2}$, имеет наибольшую величину. По закону сохранения энергии

$$W_1 = \frac{mv^2}{2}.$$

Следовательно, гармонически колеблющееся тело обладает наибольшей скоростью при прохождении через положение равновесия; у нас она обозначена v .

При движении к acb в струне нарастает вновь энергия деформации на счет живой силы, которая, наконец, иссякает вся; тогда тело остановится и готово начать обратное движение. В этот момент его потенциальная энергия деформации W_2 равна всей живой силе, из которой она произошла, т.е.

$$\frac{mv^2}{2} = W_2.$$

Из сравнения этого уравнения с предыдущим получаем, что

$$W_1 = W_2;$$

иными словами, амплитуда с одной стороны от положения равновесия равна амплитуде с другой его стороны, так как равные величины энергии деформации соответствуют равным величинам этой деформации.

Таким образом мы получаем, что при гармонических колебаниях, если принимать во внимание только силу упругости и инерцию, амплитуда сохраняется, т.е. они должны продолжаться вечно.

Примечание. Вычислим, чему равна энергия W_1 , по той работе, которую должно затратить, чтобы произвести деформацию величиною α . В каждый момент мы должны преодолевать силу $k \alpha_0$ [форм. (29)]; где α_0 означает деформацию, уже совершенную к данному моменту; эта сила на всем пути α изменяется от $k \cdot 0 = 0$, до $k\alpha$. Мы можем принять за постоянное среднюю силу $\frac{0 + k\alpha}{2} = k \frac{\alpha}{2}$; тогда работа на всем пути α оказывается равною

$$W_1 = k \frac{\alpha}{2} \cdot \alpha = k \frac{\alpha^2}{2}, \quad (30)$$

т.е. мы получаем, что потенциальная энергия деформированного тела, которую мы выше обозначали через W_1 и W_2 , пропорциональна половине квадрата амплитуды.

4. Постоянство периода. Движение гармонически колеблющегося тела по обе стороны от положения равновесия совершенно симметрично; при движении с одной стороны, потенциальная энергия уменьшается, живая сила и скорость возрастают (путь c_1c на рис. 108); при движении с другой (cc_2) — потенциальная энергия в таком же порядке увеличивается, а скорости уменьшаются. В каждой паре точек симметричных относительно c скорости одинаковы.

Следовательно, промежутки времени, необходимые для прохождения путей c_2c и c_1c , равны между собой.

Поэтому весь период делится на четыре равные четверти периода $T/4$, каждая из которых идет на перемещение между положением упругого равновесия и амплитудой.

Заключение, высказанное в конце § 1, обращается в такое: *период гармонического колебания не зависит от амплитуды.*

Каждое гармонически колеблющееся тело, каждый вибратор характеризуется известным периодом колебаний, настроен на известный период или на известную частоту.

Мы узнаем, чем определяется этот период, если вспомним, что ускорения, производимые в теле, а, следовательно, скорости, получаемые им, пропорциональны силам, которые на тело действуют, и обратно пропорциональны его массе. Следовательно, период гармонического колебания тем длиннее, чем меньше упругие силы в теле [коэфф. k форм. (29)] при данной его деформации, и чем больше его масса. Нагрузив струну каким-либо пригрузком (увеличивается m) или нагрев ее (уменьшается k), мы удлиним ее период, и, если она вообще издает звук, она будет звучать более низким тоном с меньшей частотой.

5. Затухание. Никакое движение на земле не может продолжаться вечно; ему всегда противопоставляется трение, при котором живая сила обращается в тепло, рассеивающееся из тела теплопроводностью и переносом тепла. Точно также и гармонически колеблющееся тело при своем движении теряет свою энергию на трение о частицы среды и на внутреннее трение своих собственных частей одна об другую; эта энергия теряется, рассеивается из вибратора, не участвует в дальнейших превращениях энергии колебаний. Поэтому при переходе через положение равновесия живая сила не равна первоначальной энергии деформации, но меньше ее:

$$W_1 > \frac{mv^2}{2}.$$

Точно также произойдет рассеяние энергии и во вторую четверть периода, и энергия деформации, появившаяся в конце этой четверти, окажется меньше той живой силы, из которой она произошла, т.-е.

$$\frac{mv^2}{2} > W_2.$$

Отсюда получаем, что

$$W_2 < W_1.$$

Иначе: амплитуда колебаний с каждым размахом убывает; сопротивления являются причиной этого затухания колебаний. Но так как период T не зависит от амплитуды, то и при затухающих колебаниях вибратор остается настроенным на определенный период. Сопротивление и трение увеличивают период. При достаточно большом сопротивлении колебаний не будет вовсе (T бесконечно велико); тело возвратится к нормальному положению с бесконечно малою скоростью и остановится на нем (стр. 131).

6. Излучение. Гармонически колеблющееся тело своим движением внутри среды, окружающей его, деформирует эту среду. Так струна, двигаясь из положения ac_1b (рис. 108), производит разрежение в слоях воздуха, прилегающих к ней слева; двигаясь через $T/2$ обратно, из ac_2b (рис. 108), она производит в тех же слоях сгущение. Эти разрежение и следующее за ним сгущение распространяются по воздуху во все стороны от вибратора с той скоростью (V), с которою вообще распространяется деформация по данной среде; скорость V всегда очень велика; так в воздухе V равна $\frac{1}{3}$ км в сек.

За один период эти разрежение и сгущение заполняют некоторый шаровой объем вокруг вибратора. Расстояние, на которое распространится деформация за один период колебаний вибратора, т.-е. радиус вышеупомянутого шара, называется длиной волны λ (лямбда). Очевидно, что

$$\lambda = V \cdot T; \quad (31)$$

т.-е. вибратор, настроенный на более низкий период, испускает более длинные волны.

С каждым периодом вибратор испускает по одному разрежению и сгущению, т.-е. по одной волне, которые одна за другою распространяются от него по окружающей среде со скоростью V ; эти волны уносят с собою энергию, которую вибратор тратит на деформацию прилегающих к нему слоев среды, и представляют собою новую при-

чину затухания колебаний вибратора, которую нужно прибавить к рассмотренным в § 5.

Образование волн называется излучением вибратора.

Вибраторы различной формы излучают с различной мощностью при прочих равных условиях, например, при одинаковой первоначальной амплитуде колебаний; так струны, давящие на воздух малою поверхностью, излучают слабо; наоборот, вибрирующие пластинки, мембраны излучают наиболее сильно. Понятно, что из двух вибраторов тот затухает быстрее, который больше излучает, если у обоих одинаково рассеяние энергии в трении. *Большее излучение оказывается связанным с большим затуханием.*

Пусть вибратор излучает 10 эргов в секунду; спрашивается, сколько энергии в сек получает приемник, поглощающий волны вибратора, помещенный на расстоянии 2 м от него и принимающий волны поверхностью в 1 кв. см? Вся энергия волн распределяется на шаре с поверхностью $= 4\pi \cdot 200^2$ кв. см $= 5 \cdot 10^5$ кв. см, и наш приемник получает:

$$\frac{10}{5 \cdot 10^5} = 2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{эрг.}}{\text{сек.}}$$

7. Резонанс. Через каждый элемент воздуха, по которому распространяются волны, проходят одна за другою деформации разрежения и сжатия; они следуют друг за другом через полпериода того вибратора, который испускает эти волны. Если в такой волнующийся воздух поместить, например, натянутую струну, то частицы воздуха будут толкать ее в одну сторону, когда около нее происходит разрежение, и в другую — когда происходит сжатие; воздушные волны будут заставлять ее колебаться с частотою вибратора. Это явление называется резонансом; тело, которое приходит в колебание под действием уже колеблющегося вибратора, называется резонатором.

Импульсы, которые получает резонатор от волн, идущих на него, не только принуждают его колебаться с периодом вибратора, но и вызывают в нем его собственные колебания. Если период собственных колебаний резонатора равен периоду волн (или вибратора), то два эти колебания происходят в резонаторе совершенно согласно, и резонатор получает наибольшую амплитуду; такой случай называется унисоном.

В этом случае энергия, поглощаемая резонатором из волн, падающих на него, идет всею своею величиною на увеличение энергии его колебаний, на увеличение его амплитуды. С каждою новою волной энергия колебаний резонатора, его амплитуда все возрастает. Но это

возрастание не может продолжаться без конца: с увеличением амплитуды резонатора возрастает энергия, рассеиваемая им в виде лучей и в трении (см. гл. 1, § 6).

Амплитуда резонатора будет возрастать до тех пор, пока он не будет терять столько же энергии в *сек*, сколько получает ее от вибратора.

Если периоды резонатора и вибратора не одинаковы (диссонанс), резонатор все же будет колебаться с периодом вибратора; это будут вынужденные колебания; их амплитуда всегда меньше, чем в случае унисона, так как энергия волн, поглощаемая резонатором, идет отчасти на преодоление постоянно возникающих собственных колебаний в резонаторе, несогласных теперь с периодом волн.

Если на один и тот же резонатор действовать последовательно волнами различных периодов, то наибольшую амплитуду резонанса мы получим для случая унисона; кривая, ординаты которой изображают амплитуды в резонаторе, а абсциссы — периоды вибраторов („кривая резонанса“) будет иметь у этого периода (T_0 на рис. 109) свою вершину.

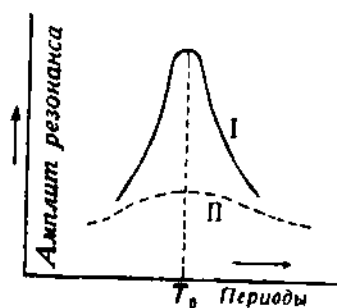


Рис. 109.

Отметим еще три обстоятельства, относящихся к резонансу:

А. Та форма тела, которая наиболее благоприятствует излучению его, как вибратора, придает ему и наибольшую способность поглощения, когда это тело служит резонатором; так, например, мембрана,

сильно излучающая вследствие большой поверхности прикосновения с воздухом, по этой же причине является и лучшим приемником волн в воздухе.

Б. Вибратор, отличающийся большим затуханием, резко выделяет период унисона среди других периодов; действительно, как мы видели выше, малая амплитуда резонанса при волнах с периодом, отличающимся от периода резонатора, объясняется стремлением резонатора колебаться с собственным периодом; при большом затухании это стремление выражается слабо; поэтому диссонанс будет мало отличаться от унисона по амплитуде резонанса. На рис. 109 кривая резонанса (II) соответствует резонатору с большим затуханием.

Такой резонатор почти одинаково отвечает на целый ряд волн; этим отличаются мембраны, деки музыкальных инструментов, и это является их ценным качеством.

В. Амплитуда унисона в резонаторе с большим затуханием меньше, чем в резонаторе с малым (рис. 109), при прочих равных условиях, так как, обладая большою рассеивающею способностью, такой резонатор уже при малой амплитуде теряет все, получаемое им из волн. Его амплитуда может увеличиться, однако, вследствие большой поглощательной способности.

Представим себе ряд резонаторов, настроенных на различные тона; если вибратор, приводящий их в колебание, обладает большим затуханием, испускает, положим, одну только волну, то все резонаторы под действием этого единственного толчка придут приблизительно в одинаковое колебание (весьма малой амплитуды). Чем больше волн излучит вибратор, чем меньше его затухание, тем резче выделится своею амплитудою резонатор, настроенный в унисон с вибратором; действительно, для того, чтобы резонатор в унисоне достиг своей наибольшей амплитуды, характеризующей его унисон, он должен получить, как мы выше видели, известное число импульсов.

Мы приходим к такому правилу: для точности настройки в унисон необходимы малые затухания в резонаторе и вибраторе.

Точная настройка позволяет распознать периоды волн, идущих к резонатору; так мы распознаем тона звуков, идущих к нашему уху, с помощью особых резонаторов (кортиевых волокон), настроенных на периоды

$$\text{от } T = \frac{1}{30} \text{ сек до } T = \frac{1}{30000} \text{ сек}$$

или на длины волн между

$$\lambda = 10 \text{ м и } \lambda = 0,01 \text{ м.}$$

8. Стоячие волны. Звуковые волны распространяются по прямому направлению, пока движутся по однородной среде; но как только волны встречают другую среду (напр., воздух с другою упругостью, или другою температурою), они частью проходят в эту среду, остальную частью отражаются. Если волны падают по перпендикуляру, например, к плоской стене, то отраженные волны движутся по тому же пути только обратно падающим; тогда через одни и те же точки среды проходят две системы волн навстречу друг другу; при этом образуются так называемые стоячие волны.

Пусть *M* (рис. 110) изображает поверхность, у которой происходит отражение; по прямой *AB* одновременно распространяются падающие и отраженные волны. Рассмотрим точку *C*, отстоящую от

A на четверть волны, т.-е. на такую длину, которую волны проходят за $T/4$; всякая деформация, например, сжатие, пройдя через C , возвратится в нее, после отражения, через $T/2$, т.-е. тогда, когда

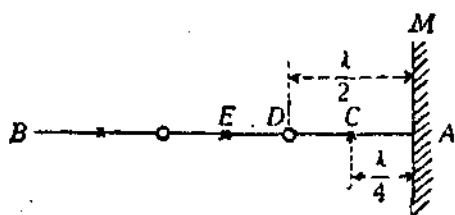


Рис. 110.

падающая волна принесет в нее обратную деформацию (в нашем примере: разрежение); полупериод есть такой промежуток времени, по истечении которого в гармонически колеблющейся точке происходит явление в обратную сторону; отсюда следует,

что в точке C падающая и отраженная волны взаимно уничтожаются. Это будет узел стоячих волн.

Наоборот, в точке D , такой, что $DA = \lambda/2$, падающая и отраженная волны всегда согласны между собой; здесь будет наиболее сильное колебание от действия обеих систем волн. Такая точка называется пучностью.

Подобным же образом можно доказать, что на расстояниях $3/4 \lambda$, $5/4 \lambda$ и т. д. (от A) находятся другие узлы, а на расстояниях λ , $3/2 \lambda$ и т. д. другие пучности.

Расстояние между соседними узлом и пучностью равно четверти длины волны; расстояние между двумя ближайшими узлами или пучностями равно половине длины волны.

Должно заметить, что при отражении волн от более плотной среды, например, волн в воздухе от каменной стены, у самой поверхности отражения происходит запаздывание на полпериода.

В этом случае в точке A будет узел (а не пучность, как на рис. 110), и все остальные узлы и пучности обменяются своими местами (рис. 111).

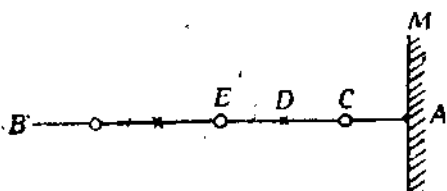


Рис. 111.

Если двигать резонатор вдоль AB , он покажет места

узлов — отсутствием отзвука и места пучностей — особенно большими амплитудами. Зная эти точки, можно определить длину волны.

Если вибратор поместить перед стеной (возьмем, например, случай рис. 111) в том месте, где должен образоваться узел его волн, то он не даст сильного звука и скоро замолкнет, так как его же соб-

ственные волны, отраженные от стены, будут мешать его колебаниям. Наоборот, вибратор, помещенный в пучности, излучает особенно сильно. Перемещая вибратор от стены (А рис. 111) до места наибольшего излучения (С), измеряют длину $AC = \lambda/4$, откуда узнается T по формуле (31).

9. Стоячие волны в вибраторе. В § 4 мы говорили, какими величинами определяется период гармонически колеблющегося тела; но приведенное там исследование относится, строго говоря, лишь к случаю точки с массой m , колеблющейся около своего положения равновесия с амплитудой ss_1 . Вибратор представляет собою ряд точек, колеблющихся с различными амплитудами (ср. рис. 107 и 109).

Мы относили все рассуждение к точке s в середине струны; чтобы понять колебания вибратора, взятого целым, необходимо воспользоваться учением о стоячих волнах.

Если мы в какой-либо точке сообщим струне ab (рис. 107) толчок, деформация из этой точки распространится *по струне* в обе стороны (со скоростью неск. сотен $\frac{\text{км}}{\text{сек}}$) и отразится от закреплен-

ных концов; это даст начало волнам, непрерывно распространяющимся по струне навстречу друг другу; образуются стоячие волны (§ 8), при чем формою вибратора определяются места узлов. В рассматриваемом случае струны, непрямые узлы должны быть на ее концах; следовательно, на этом вибраторе может уложиться полволна (одна пучность посредине), или две половины (две пучности и три узла), или три половины волны (три пучности) и т. д.

Тот период вибратора, при котором получается наименьшее возможное в нем число пучностей и узлов, называется его основным тоном (I на рис. 112); остальные периоды суть его обертоны (II, III).

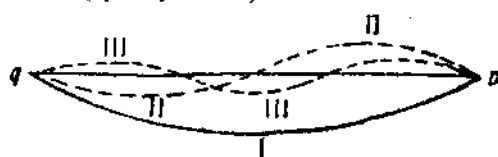


Рис. 112.

10. Электрические колебания. Зарядим конденсатор AB (рис. 113); пусть на A будет положительное электричество $+Q$, на B ($-Q$). Пусть к обеим обкладкам этого конденсатора присоединено по проводнику; если мы теперь будем сближать эти проводники их свободными концами, между ними проскочит искра, как только концы сблизятся до некоторого расстояния l ; конденсатор тотчас же разрядится чрез проводник. Но если внимательно рассмотреть явление разряда, то окажется, что, как оно ни коротко, оно

представляет собою довольно сложный процесс электрических колебаний в проводнике R и искре I .

Положительное электричество потечет по проводнику от A к B , отрицательное — обратно; это будет ток по направлению ARB ; этот ток образует магнитное поле вокруг каждого элемента проводника. С того момента, когда A и B разряжены, конденсатор уже не может давать тока, он перестал быть генератором; но теперь станет исчезать магнитный поток; по закону Ленца при этом будет индуцироваться ток, мешающий исчезновению поля, т.-е. *прежнего направления*; ток, поддерживающий магнитное поле; это будет ток самондукции; электричество $(+)$ будет *продолжать* двигаться к пластине B , $(-)$ к пластине A ; но так как эти обкладки уже были разряженными, они теперь перезаряжаются. Когда исчезнет магнитное поле, на мгновение прекратится ток; но конденсатор снова оказывается уже заряженным и снова произведет ток в проводнике R ; но теперь пойдет ток направления обратного, т.-е. BRA ; этот ток в свое время тоже будет продолжаться исчезающим магнитным полем, при чем обкладки конденсатора приобретут опять заряды противоположные только-что бывшим, т.-е. прежних знаков и т. д.

Таким образом, явление заключается в том, что конденсатор будет попеременно заряжаться зарядами обратных знаков, а по проводнику R будут идти попеременно противоположные токи. Это явление и называется электрическими колебаниями; промежуток времени, протекающий между двумя зарядами одного и того же знака, называется периодом, между двумя зарядами противных знаков — полупериодом. Цепь ARB называется электрическим вибратором или колебательным контуром.

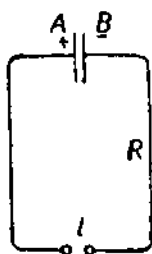


Рис. 113.

Эти колебания непременно затухают, так как каждый ток сопровождается выделением джоулева тепла в проводнике R , и уже по этой одной причине заряды на конденсаторе с каждым полупериодом оказываются меньшими.

Таким образом, одинокая быстротечная искра, которую мы видим в воздушном промежутке I (рис. 113) при сближении проводов, ведущих от обкладок заряженного конденсатора, на самом деле представляет собою целый ряд искр попеременно обратного направления, все уменьшающихся по яркости. Помощью вращающегося зеркала можно разложить такую „колебательную“ искру на отдельные составляющие ее разряды (Феддерсен 1861 г.).

§1. Период электрических колебаний. Мы видим, что электрические колебания представляют собою превращение энергии электрического заряда, электрического поля (между обкладками конденсатора) в энергию магнитного потока и обратно. Но запас этой энергии с каждым превращением становится все меньше, так как попутно она рассеивается в виде Джоулева тепла.

Все сказанное в §§ 3 и 5 вполне применимо к этому явлению, если электрическую энергию мы будем рассматривать, как потенциальную, а магнитную — как кинетическую. Энергия заряженного конденсатора равна

$$W_1 = \frac{Q \cdot E}{2},$$

где Q обозначает заряд и E разность потенциалов между его обкладками. По формуле, служащей определением емкости, $Q = C \cdot E$, мы получаем

$$W_1 = \frac{1}{C} \cdot \frac{Q^2}{2} \dots \dots \dots (32)$$

Аналогично формуле (30), мы называем заряд конденсатора амплитудой электрических колебаний. Сопротивление проводника R аналогично тому трению, вследствие которого энергия колебаний обращается в тепло, рассеивается из колеблющейся цепи, и колебания затухают.

Рассмотрим, от чего зависит период колебаний. Если мы увеличим C , то при той же амплитуде Q мы получим меньшую разность потенциалов $E = \frac{Q}{C}$; следовательно токи в R пойдут меньшие (по закону Ома), и разряд будет происходить медленнее. Следовательно, T увеличивается с C . Так оно и должно быть, ибо, сравнивая формулы (30) и (32), мы замечаем, что роль коэффициента упругости k в электрических колебаниях играет величина обратная емкости $\frac{1}{C}$,¹⁾ а в § 4 (стр. 217) было указано, что с уменьшением k период удлиняется.

Увеличим в нашем вибраторе способность производить вокруг себя магнитное поле, введем, например, в проводник R несколько витков соленоида (рис. 114); иначе говоря, увеличим самоиндукцию (L)

¹⁾ Или величина обратная диэлектрической постоянной, которой емкость пропорциональна (стр. 177).

цепи; тогда при данном Q и $E = \frac{Q}{C}$ мы получим токи, медленнее возникающие и дольше продолжающиеся вследствие увеличенной инерции. Следовательно, T увеличивается с L .

Увеличивая амплитуду Q , мы не изменяем периода: большее количество электричества должно в этом случае пройти по цепи R , но оно проходит под эдс $E = Q/C$ во столько же раз большею, т.-е. большими токами; а большие токи переносят за то же время большие заряды. Период электрического вибратора не зависит от амплитуды, как это известно и относительно механических колебаний.

Точная теория приводит к такой формуле для периода электрических колебаний (формула Томсона 1853):

$$T = 2\pi \sqrt{LC}.$$

Сопротивление R несколько увеличивает период, но этим обыкновенно пренебрегают, так как R обыкновенно мало; однако, если это нужно, R может быть взято столь большим, что разряд произойдет без колебаний подобно тому, как и механические колебания могут быть заглушены большим трением (§ 5).

12. Простой способ демонстраций колебательной искры состоит в следующем: от индукционной катушки проскакивает искра между тонкими (около 0,25 мм диаметр.) платиновыми проволочками; она слабо светит, почти не звучит и имеет строго определенные концы: ее положительный электрод раскаляется до-бела, кончик платиновый плавится, образуется королек; отрицательный же едва раскаляется до-красна. Эта определенность направления искры показывает, что индукционная катушка дает разряд только при своем размыкании (см. стр. 129 и 184).

Если теперь ввести параллельно искровому промежутку конденсатор, разряд обращается в ярко светящуюся, трещащую — колебательную искру, оба электрода которой одинаково слабо нагреты. Эту искру дает колебательный разряд конденсатора, заряжаемого с каждым размыканием в катушке и разряжающегося через искровой промежуток.¹⁾

Искру, питаемую индукционной катушкой, и имеющую в ответвлении конденсатор, можно „зажечь“ ультрафиолетовым светом, напри-

¹⁾ Можно устроить так, что и прежняя искра будет продолжать проскакивать: оба явления будут налагаться одно на другое.

мер, от вольтовой дуги. Под словом „зажечь“ разумеется тот эффект, что при действии лучей искра проскакивает гораздо мощнее и чаще, чем без этого действия (фотоэффект, стр. 267). Для получения описываемого явления электроды могут быть взяты в виде шариков, например, латунных, а также в виде шариков и острия.

В последнем случае, однако, лучше, если острие отрицательно, т.е. если при размыкании первичной обмотки индуктория ток вторичной обмотки идет по воздушному промежутку с шарика на острие. Если острие положительно, то при достаточно сильном ультрафиолетовом освещении получается обратный эффект: колебательный разряд пресекается, искра „тушится“.

13. Электромагнитное излучение. Электрические колебания в неясной форме давно уже замечались внимательными наблюдателями; так, например, замечали, что если стальную иглу намагничивать в соленоиде, по которому пропускается ток разряда лейденской банки, то игла нередко оказывалась намагниченной не током ARB (рис. 113), но обратным.

Первый, кто объяснил необходимость электрических колебаний при разряде конденсатора в цепи с не очень большим сопротивлением, был В. Томсон (впоследствии лорд Келвин). В своей совершенно теоретической работе (1853 г.) Келвин исходил из понятия о самоиндукции и кинетической энергии тока. Можно сказать, что электрические колебания были открыты теорией. Лишь почти через 10 лет началось их опытное исследование (Феддерсен и друг.).

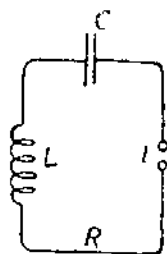


Рис. 114.

Келвин подверг тонкому анализу все, что происходит в колебательной цепи, но, не разделяя фарадеевской теории, он не обратил внимания на явления в окружающей среде. Вследствие этого, он не заметил, что во всяком электрическом вибраторе существует еще вторая причина затухания, помимо джоулева тепла: вибратор излучает электромагнитные волны, подобно тому, как механически колеблющееся тело излучает в пространство свою энергию в виде волн в воздухе.

Электромагнитные волны теоретически были указаны Максвеллом и послужили для него основанием новой теории света.

14. Электромагнитная теория света. По первоначальной теории свет считался потоком материальных частиц, летящих от источника; этот взгляд поддерживал Ньютон. В XIX в. одержало верх учение

о свете, как волнах, о цветах, как колебаниях различных периодов. Оно победило теорию истечения простотою и общностью своих выводов.

Сначала световые волны считались колебаниями продольными, как волны звука в воздухе. Явления поляризации света объяснимы, однако, только в том случае, если световые колебания поперечны. Деформация, которую передает светоносная среда, происходит не вдоль луча, но поперек его. Став на эту точку зрения, теоретически старались вывести все световые явления, как следствия законов механики, исходя из возможно меньшего числа основных положений (уравнения Френеля). Так возникла замечательно полная и точная механическая теория света. Но сравнительно скоро ее место заняло иное учение.

Когда Фарадей убедился в роли среды при электрических и магнитных процессах, размышлял о движении электрического натяжения перпендикулярно своему направлению (стр. 195), он уже приходил к той мысли, что электромагнитная среда и светоносный эфир — одно и то же. Основываясь на этом, он искал связь между светом и магнитным полем и после долгих трудов нашел ее в таком виде: в поляризованном луче света, если он проходит вдоль магнитного потока, плоскость колебаний поворачивается. Это действие магнитного поля на световой луч поразило самого Фарадея более, чем какое-либо другое из его замечательных открытий.

Максвелл, придав математическую форму тем двум главным положениям по электромагнетизму, которые приведены на стр. 195, доказал, что из них получаются уравнения Френеля и, следовательно, все учение о свете. Максвелл заменил, таким образом, в теории света термины механические: масса, упругость, движение — терминами электромагнитными: магнитная проницаемость, как величина, от которой зависит магнитное поле, инерция электричества в движении, кинетическая энергия тока; величина обратная диэлектрической постоянной, измеряющая (стр. 225) упругие свойства диэлектрика, и, наконец, ток. Теория света, сохранив характер волновой теории, стала электромагнитной; одним из ее выводов был тот, что свет должен обнаруживать давление на тело, на которое он падает; действительно, если по лучу света распространяются перпендикулярные к нему электрическое и магнитное поля, то вдоль этого луча должны быть заметны силы распора, стремление этих полей занять возможно большее сечение. Это давление очень мало: на самой поверхности солнца его свет давил бы на абсолютно черную поверх-

ность в 1 кв. см всего лишь с силою в 2,75 мг. Старая теория истечения также предсказывает необходимость светового давления, но вдвое большей величины. В 1900 г. П. Н. Лебедеву удалось доказать существование этого давления в лучах света вольтовой дуги, при чем оказалось, что величина давления совпадает с тем значением, которое дает волновая электромагнитная теория света.

Новая теория света замечательно истолковывает наши оптические представления. Электрическое натяжение, несущееся в луче света (и перпендикулярное направлению луча), поглощается в металле, превращаясь в джоулево нагревание; поэтому вместо: непрозрачное тело (поглощающее все световые волны), можно говорить: проводник и называть тепло, раскаляющее железную крышу в лучах летнего солнца, — в некотором смысле джоулевым теплом. Тела прозрачные пропускают свет, потому что они выдерживают электрическое натяжение, как диэлектрики; мы пропускаем в наши помещения дневной свет, пользуясь электрическими изоляторами.

Диэлектрики различаются между собою своею постоянною; при том же самом потоке электрической индукции тот из них обнаруживает в себе большие напряжения, большие силы упругости, в котором k меньше. В явлении света эта большая упругость сказывается в большой скорости его распространения; поэтому „большая диэлектрическая постоянная“ это значит: малая (сравнительно с пустотою) скорость света.

Вот почему указанные на стр. 173 величины k лишь приближительны; как скорость света различна для волн различных периодов (светорассеяние), так и диэлектрическая постоянная диэлектрика зависит от того, постоянный ли заряд конденсатора ($T = \text{беск.}$), или переменный, а в последнем случае — с каким T . В газах светорассеяние ничтожно: поэтому их k может быть указана точно и без оговорок.

Анализируя свои уравнения, выражающие распространение электромагнитного поля, Максвелл получил точное выражение для скорости электромагнитной волны. Перенеся это выражение на явление света, он получил способ определения скорости света из электрических и магнитных величин. Результат этот может быть выражен так: показатель преломления какой-либо среды, т. е. отношение скорости света в пустоте к скорости света в этой среде, равняется $\sqrt{k\mu}$, где k и μ суть диэлектрическая постоянная и магнитная проницаемость среды, измеренные (ср. стр. 173 и 81) относительно пустоты. Эта удивительная теория дает возможность измерить

показатель преломления, чисто оптическое свойство тела, не прибегая к призмам, линзам и даже не пользуясь вообще световыми лучами. И действительно, измерения показателя преломления различных сред, произведенные как чисто оптическим путем, так и на основании закона Максвелла, дают во многих случаях одинаковые численные результаты.

15. Электромагнитные волны; токи смещения. Большие успехи теоретической науки появляются всегда, как результат какого-либо нового принципа. Какой новый принцип после фарадеевской теории был провозглашен Максвеллом? Он заключается в признании токов смещения; этим принципом положение о замкнутости электрического тока, на которое мы столько раз опирались в предыдущем, распространяется на все случаи „течения электричества“, возможные в природе.

На первый взгляд кажется, что когда мы говорим о заряде или разряде конденсатора, то идея о непрерывной замкнутости электрического тока терпит ущерб. Действительно, при зарядке или разрядке конденсатора (рис. 113 или 115) электричество течет с одной его обкладки, например, A на другую B ; ток проходит по разомкнутому проводу R , но не идет по диэлектрику BA . То же самое можно сказать и про конденсаторные токи, упоминаемые на стр. 204.

Однако, это недостаточное представление тотчас же восполняется, если вспомнить, что зарядение и разрядение конденсатора — не простое притекание и стекание электричества к обкладкам и с обкладок, но и образование и исчезновение электрического потока в диэлектрике.

Максвелл установил понятие о смещении; оно происходит в диэлектрике вдоль электрического потока, когда этот поток образуется; это смещение все увеличивается, пока увеличиваются „заряды“ и своим направлением „ток смещения“ замыкает на себя заряжающий ток, идущий по проводам. Смещение происходит в обратную сторону при разряде конденсатора, соответственно обратному направлению тока разряда. И в это время „ток смещения“ замыкает собою ток разряда по проводам. Направление тока смещения при зарядке совпадает с направлением силовых линий,

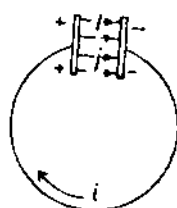


Рис. 115.

которые им образуются (рис. 115); при разрядке ток смещения в диэлектрике направлен от $(-)$ обкладки к $(+)$ обкладке конденсатора (рис. 116).

Когда смещение произошло или исчезло — ток смещения прекратился. В диэлектрике конденсатора, статически заряженного, как и в изоляторе, окружающем незаэлектризованные тела — тока смещения не существует.

Ток смещения представляет собою так же трату энергии генератора, как и ток по проводнику; но только энергия тратится здесь не на нагревание, но на образование электростатической энергии в диэлектрике; энергия генератора аккумулируется в диэлектрике подобно тому, как запасается энергия в деформированном упругом теле; она возвращается обратно при движении частиц к положению равновесия. В электрическом случае мы говорим тогда: „конденсатор разряжается“.

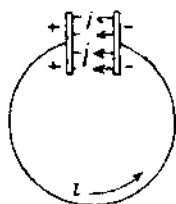


Рис. 116.

Ток смещения не есть фикция, служащая к установлению единообразия в понятии тока для всех случаев его, как явления замкнутого; это есть физический процесс и он тождествен с током в проводнике, тождествен по тому магнитному полю, которое поддерживается им за все время, пока смещение изменяется. Поэтому, когда электрическое поле распространяется по среде перпендикулярно направлению своих силовых линий, т.-е. все новые места на фронте этой волны становятся под электрическим напряжением — в этих местах происходит ток смещения, и перпендикулярно ему существует магнитное поле (ср. стр. 195 положение 1-ое). По этой причине волна, о которой заговорил Максвелл, называется электромагнитной.

Предуказанием, что скорость распространения электромагнитных волн равна скорости света, Максвелл ввел в 70-х годах прошлого века новое представление о свете. Книга Максвелла почиталась очень трудною; ведь, фарадеские представления были признаваемы еще только одним ее автором! Лишь в 80-х годах, чрез полвека после первых выступлений Фарадея, молодой германский ученый, Герц, по предложению Гельмгольца, принялся за тему выявления на опыте максвелловских результатов. Начало работы Герца было неудачно: он пытался прямо установить существование магнитного поля токов смещения; явление не обнаруживалось. История вопроса показывает, что тут требовалось не систематическое следование на опыте по пятам теории, начиная с ее центрального положения, каковым являются, действительно, как мы указывали, токи смещения. Для того, чтобы явления заговорили, нужен был экспе-

риментаторский прием, некоторый ключ к явлениям, который и появился случайно после двух лет тщетных попыток.

Герц открыл, что если заряжать от индукционной катушки K (рис. 117) шары A и B , соединенные со стержнями так, чтобы

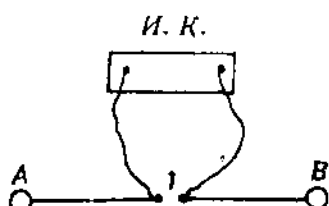


Рис. 117.

мы будем (рис. 118) A и B раздвигать в противоположные стороны до выпрямления всей цепи в одну прямую линию (шары или диски на концах A и B — это не имеет большого значения; необходима лишь известная емкость концов); отсюда понятно, что „разомкнутый“ контур есть такая же колебательная цепь, как на рис. 113, 114 и 117. Она, оказывается, отличается лишь во много раз большей способностью излучения. В настоящее время разомкнутый контур называется *антенной*.

Герц подбирал резонаторы в виде замкнутого (рис. 119) контура и исследовал свои волны. Однако, само явление электрического резонанса было уже известно из опытов О. Лоджа с замкнутыми контурами. Герц убедился с помощью этих резонаторов, что электромагнитные волны проходят чрез изоляторы и поглощаются металлами, как волны света. Но металлы служат для света еще и наилучшими отражателями; опыты Герца показали, что металлы отражают и электромагнитные волны. Воспользовавшись такими зеркалами, Герц образовал свои знаменитые стоячие электромагнитные волны¹⁾ (рис. 110); резонатор обнаружил их узлы своим „молчанием“¹⁾ в них. Расстояние между узлами давало половину волны. Здесь много помогло Герцу то, что он работал с разом-

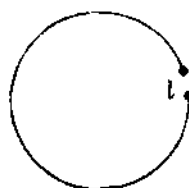


Рис. 119.

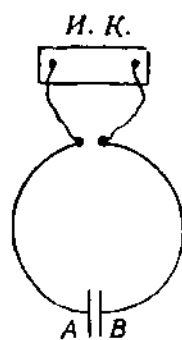


Рис. 118.

¹⁾ Наблюдение на резонаторе производилось помощью маленькой искорки, проскакивавшей в I , когда он приходил в действие (рис. 116).

кнутым контуром: вследствие удаления обкладок A и B конденсатора его емкость была очень мала, а вследствие выпрямления всего провода его самоиндукция была мала; обе эти причины сделали период вибратора столь малым, что длина волны была в несколько метров. Только это позволило Герцу в той зале, в которой он производил наблюдения, определить несколько последовательных узлов и наблюдать явление во всей чистоте. При более длинных волнах стены помещения своими отражениями спутали бы все результаты.

Зная длину волны и определив T своего вибратора по формуле Кельвина, Герц вычислил по уравнению (31) скорость распространения электромагнитных волн; она оказалась равною $3 \cdot 10^{10}$ см/сек, т.-е. равною скорости света.

Велико было число последователей Герца. Изучали преломление и отражение электромагнитных волн; применяли к ним все случаи интерференции и дифракции, известные из оптических явлений; получали двойное преломление, вращение плоскости поляризации; изучали спектр вибратора, т.-е. его основной тон и обертоны (§ 9). Можно сказать, что во всех этих работах максвелловским уравнениям был придан обратный смысл тому, который придается в электромагнитной теории света; это была световая теория (оптика) электромагнитных волн. Старались получить возможно короткие волны, чтобы подойти к световым; для этого вибраторы делались чрезвычайно малых размеров, чтобы уменьшить емкость и самоиндукцию; П. Н. Лебедев доходил до $\lambda = 0,6$ см, $T = 2 \cdot 10^{-11}$ сек; $\nu = 5 \cdot 10^{10}$. Однако, действительно световые вибраторы, дающие хотя бы инфракрасные лучи, все еще невидимые, должны быть уже молекулярных размеров.

В то же время были изучаемы способы измерить амплитуду резонанса в резонаторе иначе, чем помощью искры, как это делал Герц. Был изобретен когерер (Бранли); он представляет собою стеклянную трубку, наполненную порошком или опилками из металла; эти опилки обладают сами по себе очень большим сопротивлением. Но если такую трубку включить в цепь резонатора, то, как только колебания его достигнут некоторой, очень малой амплитуды, опилки спаяются (микроскопическими искорками), и сопротивление когерера сразу падает. Более точные способы состояли в измерении интегрального эффекта в резонаторе, т.-е. суммы действия всех волн, воспринимаемых им.

16. Применение электромагнитных волн. С 1895 г. начался третий период жизни максвелловских уравнений. До тех пор вибра-

тор и резонатор находились в одной комнате; наблюдатель, делал свои отсчеты на резонаторе, следя за работой вибратора. Между ними было то расстояние, которое требовалось для установки предмета, действие которого на волны подвергалось изучению. А. С. Попов, сначала исключительно в видах усовершенствования схемы Герца, прибавил прямолинейный проводник, т.-е. антенну, к резонирующему прибору. Причина, почему он получил хорошие результаты с этим приспособлением, ясна; тело, хорошо излучающее, должно хорошо поглощать (стр. 220, А); это положение настолько обще, что из акустики может быть перенесено совершенно в другую область: уголь или металлы, хорошие поглотители света, являются и наиболее яркими источниками его по сравнению с другими телами при той же температуре каления.

Точного объяснения действия антенны не существует еще и по настоящее время; существуют только приблизительные теории. Несомненно лишь, что при излучении ток смещения (стр. 230) со своим магнитным полем, смыкающий концы антенны и делающий ток по ней замкнутым, в некоторый момент колебания отделяется от нее. Его энергия, взятая в соответствующий момент периода из генератора, питающего антенну, не отдается вся обратно в провод, как это мы представляем себе для разряда обычного конденсатора; она излучается в пространство. Также, но в обратном порядке, при приеме волн антенной электромагнитная энергия из большого объема окружающего пространства обращается в ток смещения, смыкающий ее концы, и отдающий свою энергию проводу. Антенна хорошо всасывает в себя энергию волн.

Приемная антенна возбудила надежду воспринимать чрезвычайно слабые электромагнитные волны, приходящие из далека, могущие служить сигналами и даже способом общения. Но далекий источник не виден, и время прихода сигнала наперед неизвестно. Попов устроил автоматический прием электромагнитных волн, сопровождающийся записыванием сигналов на обыкновенном телеграфном аппарате Морзе, всегда готовый к действию. Приводим основание схемы Попова 1895 года для звонкового приема (рис. 120): когерер K включен в цепь резонатора AA ; батарея B , замкнутая на него чрез цепь $BCKЭБ$, практически не дает тока, пока сопротивление когерера нормально велико. С приходом электромагнитных волн в этой цепи пойдет ток; теперь электромагнит $Э$ притянет пластинку D , и этим замкнется вторая цепь той же батареи $BCЭ_1PDB$. Тогда электромагнит $Э_1$ притянет пластинку, снабженную шариком $У$, который ударяется

о звонок З; дается звуковой сигнал, и в то же время размыкается в точке Р вторая цепь. Ударник, отскакивая назад, по инерции доходит до трубки когерера, слегка встряхивая ее; это необходимо для того, чтобы снова

разъединить слипшиеся опилки когерера; но тогда его сопротивление становится опять громадным, и первая цепь практически лишается тока; пластинка D отходит на прежнее место. Приемник готов к действию. В 1895 г.

Попов писал: „Мой прибор, при дальнейшем усовершенствовании его, может быть применен к передаче сигналов на расстояние при помощи быстрых электрических колебаний, как только будет найден источник таких колебаний, обладающий достаточной энергией“. Не дожидаясь этого времени, Попов возымел блестящую мысль воспользоваться природным источником — грозowymi разрядами; так возник грозоотметчик Попова. Грозовые разряды особенно легко из очень большой дали и очень часто действуют на приемники электромагнитных волн; в своих первых попытках Попов пользовался тем, что теперь является лишь неотвязчивою помехою.

Так началось телеграфирование без проводов. В своих работах уже с отправительными станциями Попов к 1897 году достиг дальности расстояния в 5 верст; в этом году появились сведения об опытах Маркони, который присоединил высокую антенну и к отправительному контуру (вibratorу). Беспроволочный телеграф, радиотелеграф скоро начал играть свою роль единственно возможного средства сообщения, например, между судами на морях и между судами и береговыми станциями; между странами, разделенными океаном, радиотелеграф вытесняет передачу по телеграфному кабелю; рекорд расстояний начал все возрастать, доходя в настоящее время до тысяч километров, до половины большого круга земного шара.

Уравнения Максвелла, можно сказать, читаются теперь, как ответ на одну из насущных потребностей жизни, как разрешение такого технического вопроса, который недавно еще мог казаться

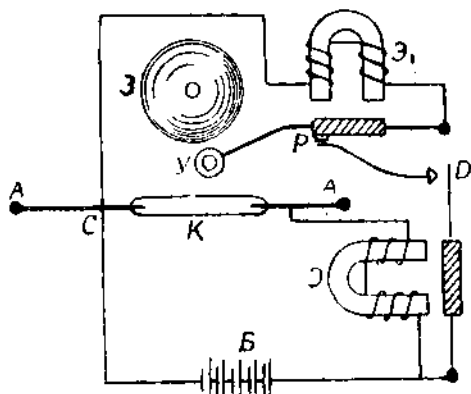


Рис. 120.

только несбыточной мечтой. Посылают сигналы, — хотя бы только сигналы, т.-е. чрезвычайно малую энергию¹⁾ — не стесняясь ни расстояниями, ни туманами, никакими препятствиями на земле, чрез пространство, с величайшею в мире скоростью, с которою распространяется свет.

17. Основная схема радиопередачи. Радиотелеграф требует для своего устройства две станции: отправительную (излучающую, вибратор) и приемную (резонатор), настроенные в унисон.

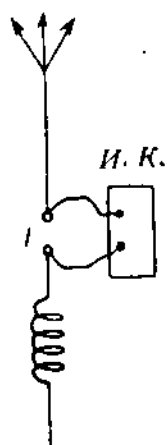


Рис. 121.

Обе станции снабжаются антеннами, которые представляют собою в главной своей части длинные вертикальные провода, поддерживаемые соответственными мачтами; к верхнему и нижнему концам этих проводов присоединяются часто еще горизонтальные или наклонные проводники для увеличения емкости, а, следовательно, и энергии [форм. (27), стр. 178] и периода антенны, а следовательно, и длины испускаемой ею волны; для этой последней цели служат и витки соленоида, вводимые в антенну (рис. 121), увеличивающие ее коэффициент самоиндукции.

В отправительной антенне делался раньше перерыв l (искровой промежуток), длина которого может быть изменяема; этим, как сейчас увидим, регулируется амплитуда первого размаха в антенне и излучаемая мощность. Такая отправительная антенна является точною, только увеличенною копию антенны Герца (рис. 117).

В простейшей схеме прежнего времени к концам воздушного промежутка l прямо и велись провода от источника электричества, например, индукционной катушки (рис. 121); при каждом размыкании ее первичной цепи обе половины антенны заряжаются до известной E , пока не проскочит искра; этим начинаются быстро прекращающиеся колебания антенны.

Пример. Емкость антенны $C = 0,025$ микроф., длина искры 1 см (30 000 V). Первоначальная энергия колебаний

$$W = \frac{Q^2}{2C} = \frac{CE^2}{2} = \frac{25 \cdot 10^{-9} \cdot 9 \cdot 10^8}{2} \text{ дж} = 11 \text{ дж}.$$

¹⁾ Это еще нельзя назвать передачей энергии в обычном смысле, т.-е. энергии, которая по своей мощности отвечала бы каким-либо потребностям,

Колебания в антенне рассматриваются аналогично вибрациям струны (§ 9). На ее концах находятся узлы тока, как в струне узлы движения (скоростей), а в середине — пучность, ¹⁾ т.е. наибольший ток (конечно, в те моменты периода, когда ток вообще идет); антенна представляет собою тот случай проводника, несущего ток, когда амперметры (напр., тепловые), включенные в различные места провода, дадут различные показания; это происходит от большого участия тока смещения в колебаниях антенны. Рис. 122 изображает линии тока смещения, например, abc , замыкающие собою соответственной линии тока в проводе (ca). Рисунок показывает уменьшение числа линий тока проводимости в тех сечениях, которые ближе к концам антенны, к ее узлам тока. Амперметр в середине антенны покажет наибольший ток, на концах — наименьший.

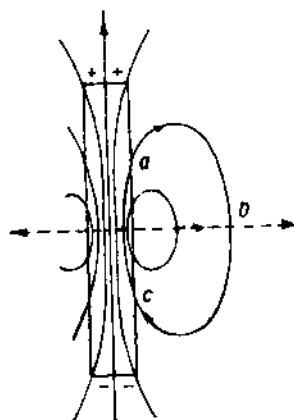


Рис. 122.

При вертикальной отправительной антенне приемная должна быть тоже вертикальна, чтобы наиболее полно собирать *поляризованные* (с вертикальным электрическим полем) волны, излучаемые первой.

Приемная антенна должна быть, как можно точнее, настроена на период отправительной.

Система телеграфирования помощью двух простых антенн имеет тот недостаток, что ее отправительная и приемная станции отличаются большим затуханием (вследствие сопротивления искры I и сильного излучения), а, следовательно, негодны для точной настройки (§ 8, Б.); вследствие этого, если действуют одновременно несколько таких станций, хотя бы и настроенных на разные периоды, приемная антенна не в состоянии их различить и будет принимать все сразу.

Не должно думать, что возможно достаточною быстротою действия прерывателя индукционной катушки уменьшить затухание антенны, т.е. возобновить ее электрическую энергию, прежде чем ее колебания затухнут до малой амплитуды. При весьма быстром прерывателе катушка возобновляет свое действие каждую 10^{-4} сек; но если даже значительная амплитуда колебаний антенны

¹⁾ Основной тон антенны; кроме него появляются обертоны.

($T=10^{-6}$ сек) держится до десятого периода, то все явление ее излучения и резонанса приемника закончится в 10^{-5} сек, и еще девять таких промежутков пройдет до того момента, когда катушка снова придет в действие, так как $10^{-5} \cdot 10 = 10^{-4}$.

Сильно излучающий вибратор способен зато действовать на большие расстояния, излучая, хотя и не долго, громадную мощность (§ 6); так предположим, что вибратор предыдущего примера излучит всю свою энергию за 8 периодов ($T=10^{-6}$ сек); тогда он представляет собою машину, работающую со средней мощностью

$$\frac{11}{8 \cdot 10^{-6}} \text{ ватт} = 1,4 \cdot 10^6 \text{ ватт} = 1900 \text{ л. с.}$$

Для получения возможности точной настройки употребляются более сложные системы на отправительной и приемной станциях.

На станции отправления индукционная катушка питает вибратор замкнутой формы (I, рис. 123); витки этого вибратора индуктируют

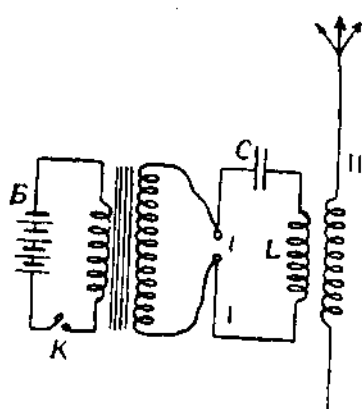


Рис. 123.

Передающая станция.

колебания в антенне (II); обе цепи связаны таким образом взаимной индукцией. Цепь I, мало излучающая, служит запасом колебательной энергии, из которого антенна черпает для своего излучения. 1) Для получения наибольшей амплитуды в цепи II (являющейся резонатором к цепи I), обе цепи должны быть настроены в унисон (§ 7), т.е. обладать одним и тем же произведением самоиндукции на емкость (LC); при этом, чтобы в цепи I был возможно большой запас энергии $\frac{1}{2} CE^2$, при данном E, определяемом длиной

искры I, ей придают большую емкость и малую L; антенна же, как обладающая сравнительно малую C, должна иметь большую самоиндукцию.

Вследствие этого малое число витков цепи I индуктирует эдс в большем числе витков II, что, как известно, является причиной более высокого напряжения во II цепи сравнительно с I. Таким

1) Искровой промежуток со своим сопротивлением находится теперь не в антенне, но в контуре I (рис. 123); есть возможность избежать причиной им потери энергии не останавливая колебаний в антенне („гаснущая“ искра).

образом, в описываемой системе кроме уменьшения затухания достигается еще и повышение вольт, сравнительно с теми, которые дает индукционная катушка.

На приемной станции (рис. 124) волнами возбуждаются колебания в антенне I, как в хорошем приемнике, которая индуцирует колебания в замкнутой цепи II, настроенной в унисон с нею; при этом большое число витков имеется во II цепи, чтобы, по возможности, увеличить ту ничтожную амплитуду эдс, которая возбуждается в антенне действием слабых волн; следовательно, емкость C (II) приемной станции должна быть весьма мала, а самоиндукция L — велика. Колебания в замкнутом контуре приемной станции приводят в действие детектор; он позволяет теперь батарее B дать ток в цепи III, вследствие чего приходят в действие приборы, служащие для приема; на чертеже опущено приспособление служащее для встряхивания. Когерер совершенно вышел из употребления; он хотя и очень чувствителен, но с капризно меняющейся чувствительностью.

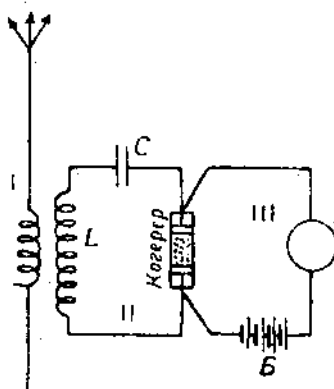


Рис. 124.

Приемная станция.

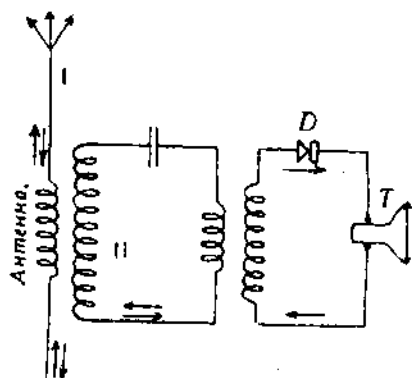


Рис. 125.

При употреблении сложной схемы отправителя (рис. 123) та же антенна может служить и для приема, как не заключающая в себе воздушного промежутка (ср. рис. 121).

18. Прием на телефон.

Современный прием производится на телефон, который может быть включен, как показано на рис. 125. Телефон (изобретатель Грэхем Белл) представляет собою намагничен-

ный стальной стержень, обмотанный тончайшею проволокою, концы которой выходят к зажимам a и b (рис. 126); сопротивление ее от нескольких сотен до нескольких тысяч омов; перед стержнем зажата в оправе тонкая железная пластинка (мембрана) m ; при про-

хождении тока через обмотку поле намагниченного сердечника либо усиливается, либо ослабляется, смотря по направлению этого тока.

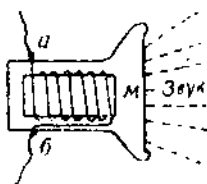


Рис. 126.

В первом случае мембрана более приближается к магниту, во втором — отходит от него. При прохождении переменного тока мембрана будет колебаться с периодом этого тока и производить звук, соответствующий этому периоду; электрическая энергия будет отчасти превращаться в звуковую. Как мы уже упоминали (стр. 220, Б), явление резонанса в обыкновенной мембране выражается очень неясно, и она почти одинаково отзывается на все периоды в пределах слышимости человеческим ухом (частота 100 — 3000 периодов в секунду).

Телеграфные сигналы состоят, если они запечатлеваются на бумаге, из длинных черточек („тире“) и коротких („точек“). При передаче этих знаков Морзе по радио батарея *Б* (в простейшем случае) отправителя рис. 123, замыкается телеграфистом посредством ключа *К* для точки, например, на $\frac{1}{15}$ сек, для тире на $\frac{1}{4}$ сек.

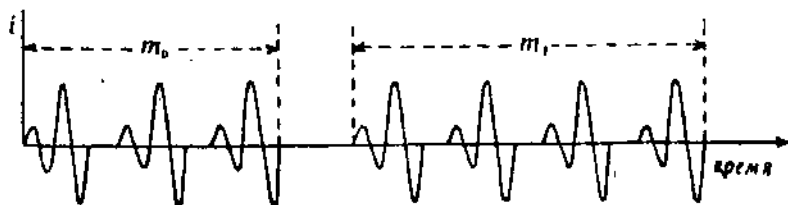


Рис. 127.

За эти промежутки времени генератор даст соответственное быстроте своей работы число искр, каждая из которых представит собою ряд (группу) колебаний и, следовательно, причинит отделение с отправитель-



Рис. 128.

ной антенны такого же ряда волн уменьшающейся амплитуды (рис. 127). Эти волны примет приемная антенна, получит контур II (рис. 125) и передаст в виде колебательного тока (рис. 128) в цепь телефона.

Но *такого* переменного тока телефон не воспримет; это — слишком быстрые колебания, так называемая радиочастота, определяемая L и C отправительной антенны, которые мембрана по своей инерции, грубой массивности выполнить не может.

Поэтому в контур телефона включается детектор D (рис. 125), который в данном случае может быть назван просто выпрямителем: кусочек кристалла, на поверхность которого пружинясь опирается металлический штифтик (кончик проволоки); такой предмет, введенный в цепь, пропускает ток (если он слабый) почти только в одном направлении, например, со штифта на кристалл (ср. стр. 291). Т. о., вследствие присутствия детектора в цепи телефона T вместо колебательного тока пройдут лишь половинки его, как показано на рис. 129.¹⁾

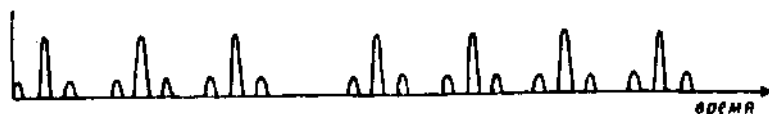


Рис. 129.

Такие половинки каждой серии (группы) волн, происходящих от одной искры, произведут на мембрану телефона по одному толчку; такие толчки были бы произведены и пульсирующим током, изображенным на рис. 130; каждый толчок поддерживает мембрану в некото-



Рис. 130.

ром положении, не давая ей времени вернуться с него в свое нормальное состояние.

Дрожание мембраны, производимое этими пульсациями, воспринимается слушателем у телефона, как некий звук; звук более длительный он воспринимает ухом, как если бы видел длинную черточку,

¹⁾ На рис. 127—140 совершенно не соблюден масштаб времени: период колебания изображен гораздо более длинным, чем должен был бы быть; например, расстояние m_0 означает $1/15$ сек, а m_1 — $1/4$ сек, следовательно, на этих отрезках должны бы были быть начерченными сотни групп волн с 10 — 15 волнами в каждой группе.

звук более короткий он оценивает, как „точку“. Слушая ряд таких сигналов, следующих друг за другом, обучившийся слухач составляет в уме буквы, слова, фразы, имея возможность даже записывать их в количестве около 20 слов в минуту.

Эта утомительная работа чрезвычайно упрощается, если на помощь приходит музыкальный характер звука в телефоне.

Для этого требуется только, чтобы пульсации (рис. 127), а значит и искровые разряды следовали друг за другом через строго выдерживаемые промежутки времени и притом находящиеся в пределах звуковой слышимости, например, через $\frac{1}{600}$ сек. Тогда ухо будет каждую точку и тире слышать, как приятный, красивый музыкальный тон, конечно, менее или более длительный.

Достигнуть такой облегчающей музыкальности сигналов с помощью индукционной катушки (рис. 121 и 123) нельзя; ее прерыватель никогда не будет действовать так правильно. Поэтому на сколько-нибудь значительных станциях применялись генераторы переменного тока, вращаемые хорошими двигателями и действующие на искровой контур через трансформатор. Многие станции большой мощности в то время, когда этот способ „музыкальной искры“ был в употреблении, работали необычайно чистым тоном.

Опытный слухач по тону легко различал, которая из мировых станций передает. Но читатель должен ясно понимать, что этот тон (звуковая частота) ничего общего не имеет с периодом колебаний передающей антенны; на этот период *радиочастоты* необходимо должна была быть прежде всего настроена вся приемная система, чтобы воспринять и самые звуки сигналов.

Музыкальная передача в значительной степени помогает избавиться от атмосферных разрядов (стр. 235), т.е. не слушать их, так как они производят на ухо впечатление шумов, тресков, шипения и т. п. не музыкальных звуков.

Схема рис. 125 отличается от схемы рис. 124 отсутствием батареи *В*. Эта батарея приводит в действие, как было сказано, „приборы, служащие для приема“; она может обладать во сколько угодно раз большею мощностью, чем мощность, идущая от антенны; мощность антенны должна только (посредством котерера) пустить в ход батарею *В*. Является вопрос, неужели телефон и человеческое ухо настолько чувствительные „приборы приема“, что для них достаточно прямое действие от приемной антенны? Действительно, это самые чувствительные приемники мощности (предел порядка 10^{-12} ватта $\equiv 10^{-5}$ эрга). Но в настоящее время, в целях увеличения дальности

приема, нередко употребляются так называемые усилители, которые позволяют телефонный прием мощностей в десятки тысяч раз меньших, чем наименьшая мощность, слышимая непосредственно в телефон; здесь опять появляется местная батарея приемника; об этом некоторые пояснения будут приведены ниже (гл. XIII, § 19).

19. Незатухающие колебания. Чем меньше затухание вибратора и резонатора, тем точнее выполняма настройка со всеми своими следствиями; вместе с тем, добавим теперь, увеличивается и дальность передачи, так как только при достаточно длинном ряде импульсов вибратор придет в колебание с амплитудой резонанса, т. е. в наибольшее возможное колебание при данной приходящей к нему мощности; если каждый ряд приходящих волн слишком рано обрывается, вследствие затухания отправителя, и мы не достигаем возможной максимальной амплитуды, сигналы не будут приняты; тогда как, если бы только ряды волн продолжались дальше, при той же мощности их прием был бы возможен.

Поэтому давно уже стали стремиться к полному устранению затухания отправительной станции. Особыми схемами можно сделать искровой разряд столь частым, что колебания антенны, возбужденные одной искрой, едва начинающие спадать, вновь возбуждаются следующей искрой.

Но гораздо более прямым путем к цели устранения затухания является возбуждение в антенне переменного тока помощью (рис. 131) генератора переменного тока, на который антенна являлась бы простым резонатором. Генератор будет действовать непрерывно и равномерно сколь угодно долгое время, и антенна, быстро придя в резонанс, будет непрерывно излучать волны неизменной амплитуды, т. е. выполнять незатухающие колебания.

Тут выступают два обстоятельства. Нельзя построить антенну, которая резонировала бы на ток обычного осветительного альтернатора (стр. 200) с периодом в $\frac{1}{50}$ сек; это — такой длинный период, что потребовалась бы колоссальная емкость и самоиндукция — невыполнимые технические сооружения. С другой стороны, нельзя построить генератор переменного тока, дающий какую угодно большую частоту: например, генератор, изображенный на рис. 97, должен был бы делать 100 000 оборотов в сек, чтобы давать при условиях чертежа частоту в 1 000 000 периодов в сек: линейная скорость точек внешней окружности якоря была бы

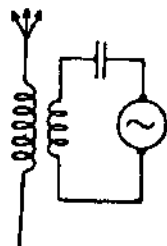


Рис. 131.

при этом около 2500 км в сек. Конечно, все это невыполнимо.

Следовательно, необходимо было, по возможности, увеличить период антенны по сравнению с употреблявшимися ранее периодами и уменьшить период генератора, чтобы оба эти периода свести к одной возможной частоте.

Антенны строят теперь столь большие, с большими емкостями, что их период доводят до $5 \cdot 10^{-6}$ сек (частота 20 000, длина волны 15 000 м). Особый тип альтернаторов, так называемые машины высокой частоты, может дать этот период.

Действие их основывается на следующем.

Если к магниту, на котором навита проволока, приближать железо, то в обмотке индуцируется эдс, направленная согласно закону Ленца; при удалении железа индуцируется эдс обратного знака. Явление это противоположно тому, на основании которого действует телефонный приемник (рис. 126); оно основывается на перераспределении магнитного потока при движении железа и происходит вследствие этого перерезывания витков линиями магнитного потока.

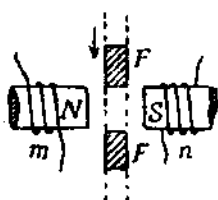


Рис. 132.

Таким образом, если между полюсами магнита NS (рис. 132) проходят железные массы FF , то при каждом приближении и последующем удалении каждой такой массы в обмотках индуцируется одна за другой две взаимнопротивоположные эдс, т.е. полный период переменной эдс.

В машине высокой частоты с большою быстротою между полюсами магнита (т.е. электромагнита постоянного тока) вращается стальной диск, часть которого изображена на рис. 133; его зубцы m представляют собою железные массы FF (рис. 132); полюса магнитов не изображены, так как они закрыли бы собою зубцы; токи, индуцируемые в их витках, собираются во внешнюю цепь. В большом образчике такой машины диск делает 20 000 оборотов в минуту и имеет на своей окружности 300 зубцов; получается период равный одной сотысячной секунды. Для уменьшения сопротивления воздуха, которое было бы очень велико, если бы зубчатая поверхность



Рис. 133.

вертелась с такою быстротою, промежутки между зубцами заполняются не магнитным материалом (с малой проницаемостью), алюминием или фосфористой бронзой.

Таким образом, получается возможность, достаточно уменьшив радиочастоту, подвести к ней частоту, получаемую при механическом вращении.

То, что дает станция с незатухающими колебаниями при передаче точек и тире, изображено на рис. 134; в приемной антенне полу-

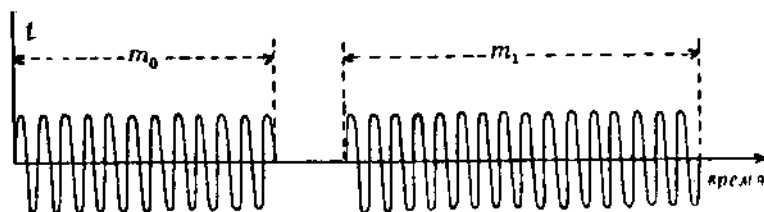


Рис. 134.

чается колебательное явление, изображенное на рис. 135; телефонная мембрана после детектирования такого колебательного процесса (ср. рис. 128, 129 и 130) получит импульсы, изображенные точеч-

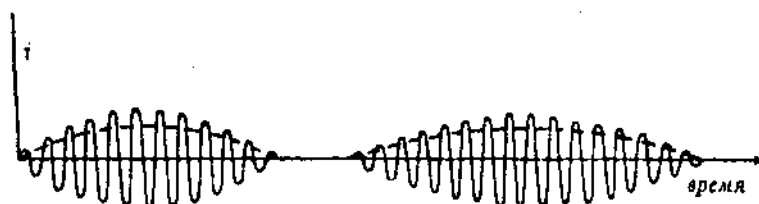


Рис. 135.

ными линиями. Различить эти импульсы, как что-то более и менее длительное, m_0 и m_1 , может только очень тонкое ухо и с большим напряжением внимания; во всяком случае, нельзя считать эти сигналы технически приемлемыми.

Для „приема незатухающих колебаний“ необходима кроме детектирования еще какая-то обработка их, дробящая приходящий сигнал на части, чтобы ухо могло по числу таких частей определенно распознать „точку“ и „тире“.

Простейшим способом такого дробления является прерывание сигнала помощью колеса (рис. 136, „тиккер“), делающего, например, 1000 перерывов телефонного контура, в сек; тогда вся „точка“ будет, при наших предположениях (стр. 240) делиться на 66 частей, а „тире“ состоять из 250 таких частей. Чаше употребляется более

сложный способ биений: колебательный контур II (рис. 137) находится под действием колебаний антенны I и одновременно другого колебательного контура (III) от местного генератора незатухающих колебаний B , колеблющегося с периодом несколько большим или мень-

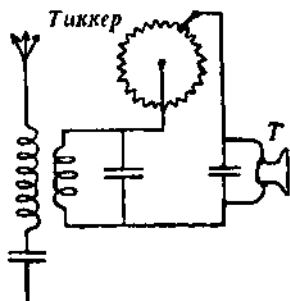


Рис. 136.

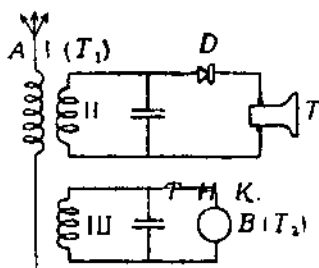


Рис. 137.

шим, чем A . Тогда в контуре II получается периодическое возрастание и падение амплитуды, подобное биениям в звуке от двух близких

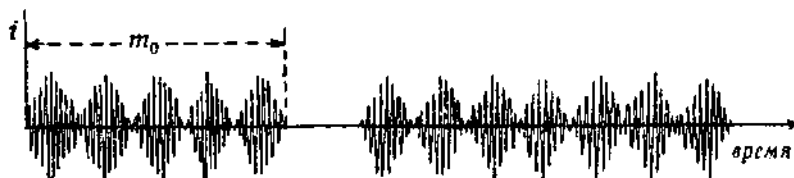


Рис. 138.

по тону источников; число биений в секунду (N) равно разности частот обоих колебаний по формуле

$$N = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}.$$

Получающееся сложное колебание (рис. 138) детектируется и телефон воспринимает сигналы в виде музыкального тона; при чем высота тона зависит от желания слухача, а не от отправительной станции, как при музыкальном приеме стр. 242, ибо он имеет возможность менять T_2 , а значит и N .

20. Радиотелефон. Обыкновенный (проволочный) телефон устраивается таким образом: на отправительной станции в цепь батареи B (рис. 139) включен микрофон M : он представляет собою, например, столбик угольного порошка с двумя электродами a и b , на который сверху нажимает мембрана; при разговоре в мембрану она приходит

в дрожание, и вследствие этого сопротивление столбика соответственно меняется. Происходящие отсюда колебания тока i индуктируют колебательные токи в цепи L , и мембрана приемного телефона T поразительно точно воспроизводит колебания мембраны микрофона; от нее идут те же звуки, слышны такие же буквы и слова, какие произносятся перед микрофоном.

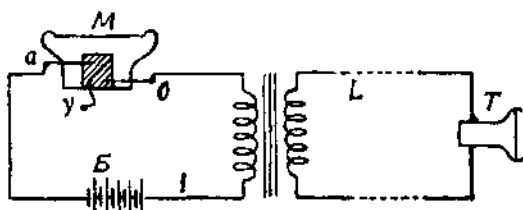


Рис. 139.

При радиотелефонировании пользуются по существу дела тем же явлением. На отправительной станции незатухающих колебаний голосом человека посредством микрофона изменяется амплитуда колебаний, как изменяется ток i батареи B при проволочном телефоне (рис. 139). Существует множество способов выполнить это; например, можно микрофон включить в ток возбуждения динамомашины постоянного тока, питающей электромагниты машины высокой частоты. Каждое увеличение сопротивления угольного порошка произведет ослабление магнитного поля между N и S (рис. 132) и соответственное ослабление индуктированной эдс в витках mn .

На приемную станцию приходят колебания, примерно изображенные на рис. 140, с чрезвычайно сложно изменяющейся амплитудой;

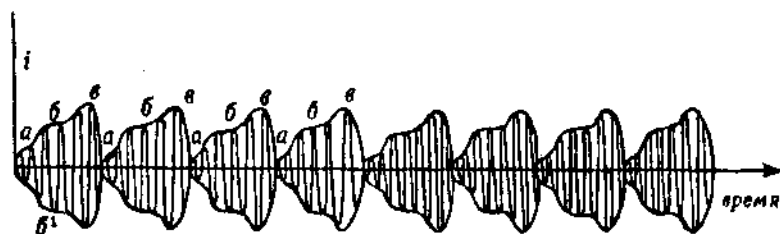


Рис. 140.

после детектирования они обращаются в сложные импульсы мембраны телефонного приемника, которая, можно сказать, как привязанный челнок, будет „качаться“ по волнам $абв абв абв...$, пока идет данный звук. Эти сложные колебания мембраны и воспроизводят слова, произносимые перед микрофоном отправительной станции.

Этот вид пользования электромагнитными волнами, теперь весьма распространенный, представляет собою особый прием „наговора“,

отпечатка, производимого словом человеческим на световых лучах, и разносимого этими лучами, строго поляризованными и незатухающими во все стороны со скоростью света; этот наговор воспринимается ухом после превращения света, которым он передается, в электрические токи помощью приемной антенны.

Только не нужно забывать о необходимости детектирования; без этого каждая вторая половинка каждой волны нашего „света“ уничтожила бы действие первой на мембрану телефона, например, b^1 уничтожила бы действие b (рис. 140), и мембрана осталась бы неподвижной. Для передачи волнами необходимы обе половины; без гребня и долины волна не существует; но для современного способа приема необходимо выделить одни гребни или одни долины.

Само собою понятно, что еще более точно можно передавать по радиотелефону звуки музыкальных инструментов, которые гораздо менее сложны, чем человеческая речь.

Практическое пользование электромагнитными волнами привело ко многим вопросам, разрешение которых еще не достигнуто. Сюда относится например, явление огибания радио волнами (их длина от нескольких метров до десятков километров) округлости земли, необъяснимое одною дифракцией света, и вообще участие поверхности земли и различных слоев атмосферы в распространении волн, участие несомненное, так как, например, над водою легче передавать по радио, чем над сушею, ночью легче, чем днем.

21. Измерение токов большой частоты и очень малой амплитуды. Струнный гальванометр (стр. 111) применим еще для токов звуковой частоты; струна настраивается в резонанс и своею амплитудою резонанса, измеряемую в микроскоп, измеряет амплитуду приходящего в гальванометр переменного тока (вибрационный гальванометр).

Для радиочастоты такие механизмы непригодны. Тепловые приборы, основанные на удлинении проволоки от нагревания током (стр. 56), не очень чувствительны. Большая чувствительность получается с термопарою; две очень тонких (для уменьшения потерь) проволоки (1—3) и (2—4) из двух различных металлов сгибаются, как изображено на рис. 141, и слегка спаяваются в точке x . Быстропеременный ток приключается к точкам 3 и 4. Место прикосновения проволочек при прохождении чрез него тока нагревается, а будучи нагретым спай x является источником термоэлектрической эдс, которая при малых нагреваниях пропорциональна поднятноту температуры спая и, следовательно, измеряет квадрат тока, проходящего чрез

него. Эта эдс измеряется гальванометром, присоединяемым к точкам 1 и 2.

Приводимая ниже таблица дает приблизительные эдс в вольтах для различных металлов, спаянных со свинцом при нагревании на 100°C , при чем концы 1 и 2 (рис. 141) предполагаются при 0°C . Эти эдс весьма зависят от чистоты металлов.

Висмут	$+0,0068$	Цинк	$-0,00035$
Никкель	$+0,0025$	Железо	$-0,00149$
Алюминий	$+0,00006$	Сурьма	$-0,00463$
Олово	$+0,00001$	Теллур	$-0,05$
Медь	$-0,00017$	Селен	$-0,08$
Серебро	$-0,00029$		

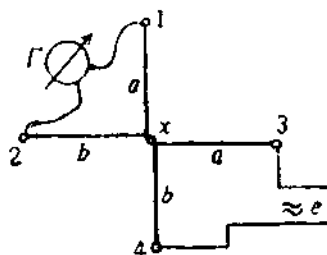


Рис. 141.

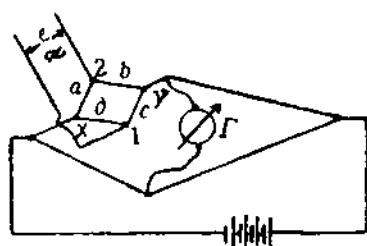


Рис. 142.

В болометрическом методе (рис. 142) пользуются схемой уравновешенного моста Витстона, в одну ветвь которого включается вторая петля из четырех сопротивлений $abcd$, тоже уравновешенных; поэтому никакая эдс, включенная между точками 1 и 2, не даст разности потенциалов между x и y , а, следовательно, и вообще в мосте, и оставит гальванометр G в покое. Но ток, идущий по bc и ad , — он может быть какой угодно частоты — нагреет эти провода; от этого изменится их сопротивление, основной мост окажется расстроенным, и по отклонению на гальванометре можно будет судить о степени нагретости проводов, а, следовательно, и о токе, производящем нагревание.

Наконец, можно пользоваться всяким чувствительным гальванометром постоянного тока с магнитною стрелкою, если колебательный ток предварительно выпрямить чрез детектор.

ГЛАВА XIII.

ЭЛЕКТРОННАЯ ТЕОРИЯ.

1. **Электронная теория** — новое слово физики конца XIX в. и начала настоящего столетия. Возникла она из целого ряда замечательных открытий — катодный поток, x -лучи, лучи радия, — впечатление от которых было столь ново, что сразу почувствовалась недостаточность прежних взглядов для понимания этих поразительных явлений.

Мало-по-малу стали обрисовываться отдельные положения учения об электронах, которые затем слились в целую теорию, распространяющуюся теперь далеко за пределы только электрических и магнитных явлений; она изменяет своими обобщениями все наше представление о физическом мире.

Таким образом, электронная теория появилась из опытных данных; в нее воплотилось стремление понять загадочные явления; появившись, она разлилась по всей науке. Она ее обновила, но не стала в противоречие с нею, не опровергает ее; этого и не могло случиться, так как и прежняя наша наука опирается на опыте. Наоборот, электронная теория широко пользуется всеми положениями, установленными до нее; поэтому, чтобы следить за этой новой теорией, нужно быть хорошо осведомленным в выводах физической науки вообще.

Но чтобы проникнуться электронной теорией, оценить ее крайние выводы, стало необходимым то критическое отношение к науке, к которому уже давно призывали отдельные мыслители, исходя из чисто философских оснований.

Дело в том, что, во-первых, наши опыты не исчерпывают всех явлений: они представляют собою, так сказать, случайный подбор фактов в той форме, как они происходят в обычных условиях, среди которых мы живем. Стремление науки расширить эти условия, про- извести явления при громадных давлениях или разрежениях, при все

более высоких или низких температурах, при необычайно высоких потенциалах и т. д. — это стремление удовлетворяется малу-по-малу, с усовершенствованием лабораторной техники. Вследствие ограниченности и случайности условий опыта наши взгляды, а также и сами опытные законы, как, например, закон Ома, могут оказаться лишь узкими, частными случаями более общих законов, которые подсказуются открытием явлений совершенно другого порядка, как, например, катодный поток.

Во-вторых, мы находимся под влиянием исторических причин. Мнения меняются; мысли наших современников, особенно — авторитетных, мы склонны считать за несомненные, единственно в силу их частого повторения и появляющейся отсюда привычки к ним; тогда как в действительности они могут быть несколько не более достоверными, чем забытые мысли великих умов предыдущих поколений. Электронная теория не считает взгляды предыдущих веков, — например, на луч света, как он понимался Ньютоном, на материальность электричества, — абсолютно неверными, но лишь грубо понятыми, соответственно эпохе их появления; она воспроизводит их в очищенном виде, обогащая этим наше представление о природе; только таким путем мы становимся готовыми к пониманию новооткрытых фактов.

Наконец, в-третьих, в нашей науке имеются догматы, ничем недоказанные положения; и догматы слагаются исторически и служат обобщением опытных данных; но они отличаются тем, что возникли с давней поры и служат для понимания всего, что мы видим вокруг себя; сюда относится масса; это понятие кажется неотъемлемым от самой деятельности нашего ума.

Электронные открытия так расширяют наш кругозор, вводят в такие подробности явлений вообще, что догматы, достаточные для более узкого знания, теперь уже должны быть заменяемы положениями более широкими, например, для понятия о массе и для смысла слова: скорость.

Но кроме всего этого критика науки обращает внимание на нашу привязанность к ощущениям; воспоминание о них неотвязчиво присутствует в наших теориях и в наших терминах: электрический ток течет, как вода; а как она течет, мы видим; разность потенциалов есть напряжение, как в нашем мускуле; частица, атом — это что-то в роде маленького камешка, подобного тому, который мы держим в руках. Электронная теория заставляет воздержаться от слишком прямого переноса наших ощущений в мир атомов, которого мы не ви-

дим; она стремится понять более отвлеченно сложные процессы, в нем происходящие.

Отметим еще, что электронная теория в большой мере механистична; она стремится выяснить внутренний механизм явления. Переходя к электронной теории, мы оставляем то чисто энергетическое учение об электрических процессах, какого почти исключительно придерживались до сих пор.

2. Катодный поток. Если производить разряды через газ не при обыкновенном, атмосферном давлении, а меньшем, то искры мы уже не получим. Это будут особые тихие разряды; газ в это время светится; будучи разложен в спектр, этот свет оказывается характерным для каждого газа и может служить для спектрального анализа. Свечение неодинаково распределяется по всей длине разряда; около его отрицательного полюса наблюдается темное пространство, в котором, следовательно, разряд не только беззвучный, но и *темный, как в металлическом проводнике*.

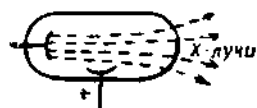


Рис. 143.

С выкачиванием газа из той трубки, в которой разряд происходит, это темное пространство все увеличивается, и при нескольких сотых частях атмосферного давления оно занимает почти всю трубку (рис. 143).

Тогда светится ярким зеленоватым светом то место стеклянной стенки, которое находится против катода, как будто от катода (—) идут лучи, путь которых внутри трубки не виден, но которые, попадая на стекло, производят в нем сильную флуоресценцию: они заставляют светиться и различнейшие другие тела, например, особенно блестяще, рубины. Помещая флуоресцирующие тела в различных местах трубки, можно убедиться, что эти *катодные лучи* действительно занимают пространство между катодом и противоположной стенкою трубки.

Они были открыты Гольдштейном (1876 г.) и Круксом (1879 г.). По своей способности производить свечение тел они могут быть сравнены с ультрафиолетовыми лучами, необыкновенной интенсивности. Но Крукс открыл, что эти лучи производят значительное давление на тело, поставленное на их пути, гораздо большее, чем давление света; они могут, как ветер, привести во вращение легкую мельничку, при чем направление этого вращения доказывает, что этот ветер направлен от катода, перпендикулярно к его поверхности.

Катодные лучи обладают, следовательно, массой, кинетической энергиею; ударяясь в тело, поглощающее их, например, листок пла-

тины, они раскаляют его до-бела; чрез некоторое время платина расплавляется под действием этих ударов.

Так называемые рентгеновы или X-лучи начинаются (рис. 143) в тех местах трубки, где катодный поток ударяется о молекулы какого-нибудь вещества, находящегося на его пути; они могут быть прослежены вне трубки на значительные расстояния до нескольких метров.

Тело, в которое ударяются катодные лучи, оказывается отрицательно наэлектризованным, и если поток катодных лучей поместить в диэлектрик конденсатора с полем перпендикулярным к направлению лучей, то поток весь со всеми своими действиями переместится против того направления силовых линий, которое придается обычно по движению положительного электричества, т.е. будет падать к положительной обкладке конденсатора (рис. 144).

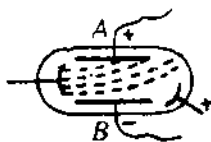


Рис. 144.

Отсюда следует, что этот „катодный поток“ заряжен отрицательно в каждом своем атоме, и что вся его кинетическая энергия возникла в электрическом поле катода, где он также стремится против силовых линий, т.е. от отрицательного полюса.

Если перпендикулярно к катодному потоку возбудить магнитное поле, то он изогнется так, как изогнулся бы ток в своем стремлении охватить магнитные силовые линии (стр. 106). Но только этот ток должен был бы быть направлен не вдоль катодного потока, а против него; так и должно быть, если катодный поток несет отрицательное электричество, ибо за направление электрического тока мы считаем то, в котором движется положительный заряд.

Таким образом, катодный поток по своим действиям есть свет, потому что производит флуоресценцию, — так думал Гольдштейн; в то же время, он есть вещество, потому что производит давление, — так полагал Крукс. Но по своей сущности, какую мы разгадываем по действию магнита на него, катодные лучи это — электрический ток.

Это первое, что и должно было сказать о катодном потоке, так как он есть разряд. Но сколько же новых сведений об электрическом токе получаем мы из наблюдений над этим разрядом!

3. Вещественный луч; электрон. Катодный поток сохраняет все свои действия и свои свойства, каким бы газом не была наполнена трубка, в которой он происходит, и из какого бы металла не был сделан катод. Отсюда вытекает положение, что он состоит

из *особого* вещества, может-быть, входящего, как составная часть, во всякий газ и всякий металл. Особенность катодного потока вытекает из всей совокупности сведений о нем, описанной выше.

Д. Д. Томсон предложил рассматривать катодный поток, как поток свободных отрицательных зарядов, отделенных от материи. За этими отрицательными зарядами, отличными от какого бы то ни было вещества, утвердилось название: электроны.

Нашею ближайшею задачею и является наполнить содержанием это современное слово, тождественное с самым древним (ср. стр. 188) электрическим термином. Для этого необходимо ввести его в обычные научные понятия. Когда электрон войдет в выражения главнейших законов, окрепнет идея о нем, а самые законы незаметно преобразуются в электронную теорию.

Представим себе целый поток параллельно движущихся электронов; они приобрели свою скорость в том поле, которое окружает катод, и движутся по инерции.

Пусть в каждом единичном объеме потока находится N электронов, и каждый из них представляет собою заряд e ; полный заряд этого объема равен $Q = Ne$. Такие объемы один за другим пробегают чрез плоскость сечения перпендикулярного потоку, при чем каждый из них пройдет чрез это сечение за время t равное $1/u$, где u — скорость катодного потока. Следовательно, поток представляет собою электрический ток величиною (на каждую единицу своего сечения)

$$i = \frac{Q}{t} = Neu. \quad (33)$$

4. Величины $\frac{e}{m}$ и u . Если катодный поток, величина которого только-что была определена, длиной l , поставить под действие магнитного поля H , то он будет испытывать электромагнитную силу

$$F = Hil = HNeul;$$

при этом каждый из электронов, так как их всего Nl , испытывает силу в Nl раз меньшую, т.-е.

$$f = Heu,$$

которая стремится искривить его путь, как показано на рис. 145; можно не допустить искривления пути, возбуждав перпендикулярно

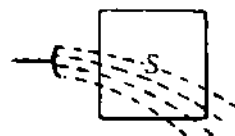


Рис. 145.

магнитному полю электрическое (рис. 144) — такого направления и такого напряжения, чтобы оно уничтожало действие магнитного поля.

Если это электрическое поле такого напряжения, что на каждую единицу электричества производит силу X (стр. 176), а значит, на каждый электрон — силу

$$Xe,$$

и если по своему действию на электрон оно равно магнитному полю, то

$$Xe = Heu;$$

откуда

$$u = \frac{X}{H}.$$

Эта формула позволяет из опыта, в котором достигнуто уравновешение электрической силой силы магнитного поля, узнать u , скорость катодного потока. Эта скорость оказывается очень большою, часто близкою к скорости света.

Теперь предоставим магнитному полю произвести искривление пути катодного потока и будем рассматривать это искривление, как действие центральной силы на электрон, движущийся по инерции. Мы можем по законам механики для центростремительной силы, превращающей прямолинейный путь в окружность радиуса ρ , написать

$$f = Heu = \frac{mu^2}{\rho};$$

откуда

$$\frac{e}{m} = \frac{u}{\rho H}.$$

Этот опыт дает величину отношения заряда электрона к его массе, если измерены ρ и H , и если из предыдущего опыта известна u .

При исследовании катодного потока пришлось впервые характеризовать предмет, в данном случае — вещество катодного потока, величиною отношения заряда его молекулы (электрона) к ее массе. Но всякое вещество можно определять этим отношением: по электролитическим законам Фарадея (стр. 156) один кулон выделяет химический эквивалент каждого вещества; а так как во всяком химическом эквиваленте одно и то же число молекул, то на каждую молекулу какого угодно химического состава приходится всегда одно и то же количество электричества. Чтобы вычислить этот заряд, обратимся к случаю электролитического выделения газа, например, водорода, так как кинетическая теория газов точно определяет число молекул для всякого газа; при давлении в 760 мм и температуре 0° Ц. оно равно $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул, в одном куб. см, или

для водорода, как двуатомного газа, $5,4 \cdot 10^{19}$ атомов. Если примем, как делали это выше, что 1 кулон освобождает 0,116 куб. см водорода, то на каждый атом его приходится заряд равный

$$\frac{1}{5,4 \cdot 10^{19} \cdot 0,116} 1600 \cdot 10^{-20} \text{ кулона,}$$

или $1,6 \cdot 10^{-20}$ электромагн. ед. колич. электричества.

Таков заряд, приходящийся на наименьшее возможное количество материи; чтобы объяснить, почему он всегда один и тот же, предполагают, что это есть наименьшее возможное количество электричества, т.-е. атом электричества.

Атом водорода имеет массу $1,6 \cdot 10^{-24}$ грамма-массы. Отсюда следует, что для водорода $\frac{e}{m} = 10^4$, если количество электричества измерено в электромагнитной CGS системе. Для всякого другого тела это отношение меньше, так как атом водорода имеет наименьшую массу между молекулами и атомами всех тел известных химии.

Для электрона, наоборот, оно оказывается больше; для этого атома катодного потока, отношение $\frac{e}{m}$ оказывается, примерно, равным $1800 \cdot 10^4$.

Предполагая, что заряд электрона представляет собою все тот же атом электричества, мы получаем для массы его величину равную $\frac{1}{1800}$ массы водородного атома.

К полной уверенности в этом результате привел опыт Вильсона. Этот ученый сосчитал число электронов, пользуясь тем, что вокруг каждого электрона конденсируются пересыщенные водяные пары, образуя капли воды (туман); эти капли, действительно, родниются силам электрического поля, как имеющие заряженное ядро; их число, а следовательно, и число электронов, было определено по весу осевшего тумана и размерам каждой капли; размеры эти могли быть вычислены по скорости оседания тумана. Затем Вильсон определил на электрометре заряд всего осевшего облака, а по числу электронов в нем — узнал заряд каждого электрона. Этот заряд оказался равным $4,7 \cdot 10^{-10}$ эл.-ст. $= 1,6 \cdot 10^{-20}$ эл.-магн. откуда и подтвердилось, что масса электрона равна $\frac{1}{1800}$ массы водородного атома.

Чрезвычайно ничтожная величина этой массы не позволяет ни в каком случае доказать на весах присутствие, скопление или убыль электронов в каком-либо теле.

Вышеприведенные данные позволяют вычислить, какое падение потенциала E должен пройти электрон, чтобы получить огромные скорости катодных потоков, например, $u = 10^9 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$. Для этого достаточно применить закон сохранения энергии; мы полагаем, что кинетическая энергия электрона получается исключительно за счет убыли его электрической энергии,

$$\frac{1}{2} m u^2 = \varepsilon E, \text{ или } \frac{1}{2} u^2 = \frac{\varepsilon}{m} E.$$

Подставляя известные величины, имеем приблизительно:

$$\frac{1}{2} \cdot 10^{18} = 2 \cdot 10^7 \cdot E, \text{ или } E = \frac{1}{4} \cdot 10^{11} \text{ эл-магн. ед.} = 250 V.$$

К опыту Вильсона. Обыкновенно говорится, что пересыщенный водяной пар должен дать воду (росу); это справедливо только в том случае, если в воздухе имеются, хотя бы очень небольшие, предметы, например, пылинки, на поверхности которых и осаждается вода. Дело в том, что если образуется вода, то появляется „поверхностный слой“ воды, обладающий особою энергиею поверхностного натяжения и поверхностного давления (направленного внутрь жидкости), энергиею тем большею, чем меньше тот „шарик“, который образует собою водяная капля появляющегося тумана; начало этого образования — шарик бесконечно-малого радиуса — невозможно, ибо на это потребовалась бы затрата бесконечно-большого количества энергии. Поэтому, для возможности образования каждой капли тумана необходимо, чтобы имелись пылинки (напр., угольная пыль из заводских труб) или ионы (см. § 5); ионы, будучи заряжены, окружены электрическим полем, которое придает поверхности оседающей на них воды силы, действующие изнутри наружу, а, следовательно уменьшающие поверхностное давление; с уменьшением же его, уменьшается энергия, потребная при образовании капли; образование тумана облегчается.

Было сказано, что Вильсон определил размеры капель по скорости оседания тумана; действительно, очень маленькие предметы, например, капли, составляющие туман, падают в неподвижном воздухе не ускоренно, но с равномерной скоростью вследствие сопротивления воздуха; имеется формула (Стокса), позволяющая по скоро-

сти падения в воздухе маленького предмета, если его считать шариком, определить его радиус. Понятно, что, зная вес воды, получившейся от осевшего тумана, можно определить ее объем, и разделив, его на объем каждой капли, узнать, из скольких капель тумана образовалась эта вода.

Б. Газ становится проводником. Ионизация. В круковой трубке имеются лишь остатки газа; ¹⁾ этот разреженный газ представляет собою изолятор. Но мы видим, что при достаточном напряжении содержимое трубки становится проводником, она замыкает собою цепь генератора.

Мы знаем, что в этом случае ток проходит помощью электронов. Имеются еще другие способы превращения газа в проводник; во всех них электроны играют первую роль. Перечислим вкратце эти способы. Как увидим ниже, они не требуют обязательно разреженного пространства. Итак, газ становится проводником:

1. При достаточном электрическом напряжении. Сюда относится и явление искры.

2. Раскаленное твердое тело делает проводником окружающий газ.

3. Фотоэффект. Сквозь газ, служащий диэлектриком конденсатора *AB* (рис. 146), пропускают ультрафиолетовые лучи направленные на отрицательную обкладку ²⁾ через отверстия в положительной; тогда гальванометр *G* показывает присутствие тока от батареи, включенной в цепь этого конденсатора, как будто газовый диэлектрик перестал быть изолятором (опыт А. Г. Столетова, 1892 г.). В подобных же условиях проходит ток через газы, пронизываемые рентгеновскими лучами и лучами радиоактивных тел, без помощи света.

Рис. 146.

Во всех этих случаях могут быть констатированы электроны, как начало всего процесса.

Электроны отрываются от катода круковой трубки большим электрическим напряжением. Из раскаленного металла или угля они

¹⁾ Слово „остатки“ не обозначает, однако, малого числа в обычном смысле этого слова; если даже достигнуто разрежение до давления в миллиард раз меньшего, чем атмосферное, то все-таки в каждом куб. см остается по 27 миллиардов молекул.

²⁾ Особоливо, если она представляет собою свеж вычищенную цинковую пластинку.

вылетают сами; нагревание тела есть ускорение внутренней толчи его частиц; при высокой температуре накала это частичное движение так быстро, что электроны тела (которые, как увидим ниже, в проводниках свободны, не связаны с молекулами), принимающие также участие в этом движении, вылетают через границы тела в окружающее пространство. Лучи света также выбивают электроны из металлов. Наконец, радиоактивные тела превращают газ в проводник иногда прямо своим катодным потоком, вылетающим из них и носящим название бета-лучей.

Если катод крутковой трубки, или раскаленный проводник, или цинковая пластинка, освещаемая светом, или радий окружены возможно совершенной пустотой, то вылетающие электроны образуют чистый катодный поток. Во всех этих случаях его анализируют обычным способом скрещенных полей (§ 5); определяют его скорость и устанавливают, что он состоит все из одних и тех же электронов с отношением заряда к массе равным $1,8 \cdot 10^{17}$, если заряд измеряется в электромагнитных CGS единицах, а масса в граммах.

Но ток через газ при атмосферном или каком-либо уменьшенном давлении не представляет собою чисто электронного потока; он производится также и частицами, двигающимися, однако, гораздо медленнее, чем электроны.

Чтобы понять это явление, приходится создать более сложную картину ионизации, которая в то же время служит объяснением происхождения электронов.

Каждый атом всякого вещества состоит (рис. 147) из ядра, представляющего главную часть массы атома, и электронов. Не имея свободных электронов, газ — идеальный изолятор.

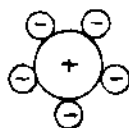


Рис. 147.

Но уже само электрическое поле, действуя на положительно заряженное ядро и электроны атома

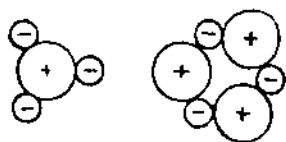


Рис. 148.

в противоположные стороны, при достаточном своем напряжении способно разорвать эти две составные части атома; тогда образуются электрон и $(-e)$ ионизованный атом, или молекула; при значительной упругости ионизованные атомы могут образовывать более сложные группы (рис. 148), при чем преимущество может оказаться и на стороне отрицательного электричества („минус ионы“).

Теперь газ обладает уже электрически полярными элементами, которые задвигнутся вдоль силовых линий электр. поля; $(+)$ ионы к отрицательному его концу, электроны и $(-)$ ионы — к положительному; пойдет ток. Так происходит разряд в газе под большим напряжением (напр., тихий разряд, стр. 189).

Если в газе находятся электроны, происшедшие по какому-либо из выше перечисленных способов, они, получая ускорение от электрического поля и случайно на своем пути ударяясь в атомы, разбивают их на электроны и $(+)$ ионы; это еще более превращает газ в проводник. Явление будет тем резче, чем более разрежен газ, тогда электроны будут иметь больший свободный путь, больший разбег под действием электр. силы, будут приобретать кинетическую энергию достаточную для разбивания атома и при небольшом напряжении электр. поля. Вот почему для разряда в газе при малом давлении требуется меньшее напряжение электр. поля.

При своих встречах ионы противоположных знаков рекомбинируются, т.-е. снова воссоединяются в атомы с нормальным числом электронов; поэтому газ, ионизированный, напр., X -лучами, через некоторое время оказывается потерявшим способность проводить ток.

Если непрерывно ионизируемый газ, например, в опыте Столетова, находится под известною разностью потенциалов E , то пойдет ток; при этом лишь некоторая часть всех образующихся за секунду ионов будет участвовать в этом токе; остальная исчезнет в рекомбинации.

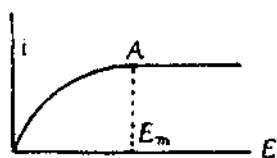


Рис. 149.

Увеличивая E и, следовательно, скорость ионов, мы уменьшим вероятность их встреч и рекомбинации, и ток увеличится. Когда, наконец, E станет столь большим, что рекомбинация будет невозможна, и все ионы будут участвовать в токе, тогда ток будет максимальным, или „током насыщения“ (A на рис. 149). Дальнейшее увеличение E не будет сопровождаться возрастанием i . Это было наблюде-

но впервые Столетовым.

Следовательно, в ионизированном газе возрастание тока i с увеличением E происходит по гораздо более сложному закону, чем закон Ома, закон простой пропорциональности i и E .

Массы электрона и ядра атома находятся приблизительно в таком же отношении (0,001), как масса малых планет солнечной системы и самого солнца. Естественным явилось предположение, что электроны вращаются вокруг своего ядра, образуя с ним своего рода солнечную систему, с линейными размерами, уменьшенными в 10^{22} раз.

Периоды вращения электронов (их „годы“) и были бы тогда периодами световых колебаний; электроны своим вращением вокруг ядра атома и служили бы причиной образования электромагнитных волн, т.-е. излучения света атомом. При таких предположениях можно было предвидеть, что если в светящееся тело, например, окрашенное газовое пламя, ввести магнитное поле, то орбиты электронов будут стремиться встать перпендикулярно к полю, как круговой проводник, с током своею петлею стремится охватить магнит; и кроме того электроны изменят свои периоды, так как к прежней центростремительной силе прибавится еще новая — электромагнитная (ср. § 4). Для наблюдающего свет, испускаемый газом, это должно выразиться в том, что этот свет станет поляризованным, и что длина световой волны станет иною, чем была бы без магнитного поля. Все это вполне подтвердилось на опытах (Зееман, 1896 г.).

По изменению длины волны, т.-е. светового периода, и напряжению магнитного потока, который это изменение причиняет, в опыте Зеемана можно было определить $\frac{e}{m}$ частиц, испускающих свет; оно оказалось равным $1,8 \cdot 10^7$, т.-е. эти частицы суть электроны.

Следует упомянуть еще, как о типичном выводе электронной теории, что, если подсчитать число электронов в катодном потоке крутковой трубки, или в β -лучах радия, или в каком-либо другом процессе — всегда оказывается, что число расщепившихся атомов ничтожно в сравнении с общим числом их в том теле, которое участвует в данном явлении.

Для примера, правда, крайнего по своей малости, рассчитаем сколько ионов (а след., электронов) должно находиться в обыкновенном воздухе, чтобы объяснить естественную потерю заряда с хорошо изолированного электроскопа. Это явление объясняется тою естественною ионизациею, которая производится дневным светом и т. п. обычными агентами.

Известный исследователь радиоактивных явлений утверждает, что порядочный электроскоп с золотыми листочками, разряжается естественным образом на 6 В в час. Емкость обычного электроскопа около 1 см эл.-ст. Объем воздуха, заключенного в его ящике, — 1000 куб. см (литр).

$6 \text{ В} = \frac{6}{3600} \text{ эл.-ст.}$ Заряд, теряемый прибором в 1 сек, т.-е. ток с него $i = \frac{C \cdot E}{3600} = \frac{1 \times 6}{3600 \cdot 300} \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ эл.-ст.}$ Так как этот ток

идет непрерывно, то соответственное число электронов непрерывно производится ионизирующими агентами за каждую секунду. Это число равно

$$\frac{5 \cdot 10^{-6}}{4,7 \cdot 10^{-10}} = \text{прибл. } 10^4 \text{ электронов}$$

в том воздухе, который служит диэлектриком между листочками и ящиком электроскопа, т.-е. в одном литре.

Итак, мы видим, что за одну секунду образуется 10 электронов в каждом куб. см воздуха, заключающем в себе, как было выше упомянуто, $2,7 \cdot 10^{19}$ молекул.

6. Атомность электричества. Основное определение заряда электрона. Мы говорим, что отрицательное электричество состоит из атомов, которые называются электронами. Положительный заряд также атомистичен, т.-е. существует только в количествах кратных электронному заряду; он всегда связан с ядром атома, определяющим почти всю массу последнего.

Вопрос о положительном заряде, с одной стороны, сталкивается с другим вопросом — что есть материя, т.-е. (§ 10) ядро атома, а, с другой стороны, лишен острого интереса, так как электронную теорию можно рассматривать, как унитарную теорию электричества (стр. 169); заряжая положительно — мы отнимаем от тела электроны, заряжая отрицательно — вводим их в тело. Но электронная теория, благодаря идеи об атомности электричества, положенной в ее основание, придает этому унитарному представлению особый оттенок. Так как электроны всегда одни и те же и всегда, как „атомы“ — целые, то электризовать тела можно только скачками, целыми электронами. Всякий (+) или (—) заряд есть кратное того количества электричества, равного $4,7 \cdot 10^{-10}$ эл.-ст. единицы (которая сама в миллиарды раз меньше кулона), какое представляет собою электрон.

Опытная проверка этой кратности чрезвычайно важна для электронной теории. Она не только подтверждает ее главное положение, но и представляет собою самое непосредственное определение величины этого элементарного заряда. Однако, такой опыт с обыкновенными предметами невозможен. Зарядив какой-либо небольшой предмет, с самою небольшою емкостью, например, шарик радиусом в 1 см (емкость $C = 1$ в эл.-ст. системе), до одной десятой вольта ($\frac{1}{10000}$ ед. напряжения в эл.-ст. системе), мы вызовем этим электрическое явление меньшее, чем в одну десятиллионную эрга по энергии, т.-е. весьма трудно определяемое на опыте; и тем не менее, в этом явде-

нии будут участвовать, как нетрудно подсчитать, уже $\frac{2}{3}$ миллиона электронов. Следовательно, измерения такого маленького процесса должны (напр., точное измерение вольтажа) быть произведены с точностью до 0,0001%, чтобы можно было ответить на вопрос, нет ли в заряде шарика какой-либо части электрона, целое ли число электронов представляет собою этот заряд.

Формула для энергии заряда

$$W = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

показывает, что следует чрезвычайно уменьшить емкость, т. е. радиус заряжаемого шарика, чтобы при весьма малом Q , весьма малом числе электронов, получить все же энергию, допускающую большую точность измерения.

Тонкие экспериментаторы Милликен (Америка), А. Ф. Иоффе (Ленинград) пользовались для этого микроскопическими шариками — пылинками, например, из серебра; шарики вдувались в пространство между горизонтальными обкладками конденсатора AB (рис. 150), заряженные, например, отрицательно; далее, подбирался такой вольтаж E (измеренный электрометром) у обкладок конденсатора, чтобы шарики только-что не падали вниз. Если назовем вес шарика через p , а силу, с которой электрическое поле тянуло его вверх, через f , то для равновесия получаем условие:

$$f = p.$$

Но $f = X \cdot Q$, где X (при равномерном поле, гл. IX, § 7) $= \frac{E}{l}$; следовательно, получаем уравнение для определения Q :

$$XQ = p, \text{ или } Q = \frac{p}{X}.$$

Вес шарика определялся по его размерам; требуемое для равновесия X могло подбираться простым движением скользящего контакта a . Заряд Q на одном и том же шарике как угодно менялся: для этого заряженный шарик подвергался действию лучей радиоактивных веществ или ультрафиолетового света.

И всегда оказывалось, что Q есть кратное одного и того же заряда, а именно заряда, равного $4,7 \cdot 10^{-10}$ электростат. единиц.

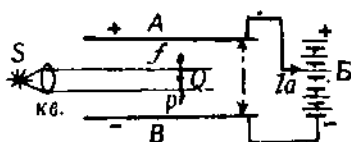


Рис. 150.

Таким образом, эти опыты, требовавшие преодоления больших экспериментальных трудностей и тысячекратных повторных измерений, доказали атомное строение отрицательного электричества и дали особо точную величину для заряда, представляемого одним электроном. По Милликану, этот заряд равен

$$e = 4,774 \cdot 10^{-10} \text{ электростат. CGS единиц,}$$

с точностью до 0,1% этой величины. Все остальные способы определения e , упомянутые выше, как не прямые, могли определенно указать на присутствие электрона, на его роль в явлении, но не могли дать его точной величины.

7. Возникновение X-лучей. Теперь мы несколько полнее ознакомились с катодным потоком: он состоит из отдельных электронов, так или иначе отнимаемых от атомов различных тел. Некоторое представление получили мы и о самом электроне. На основании всего этого можно ближе подойти к явлению возникновения рентгеновских, или X-лучей. Мы увидим, что полученные при этом сведения имеют огромное значение.

При современном устройстве рентгеновских трубок, катодный поток ударяется в поставленное на его пути тело (рис. 151), назы-

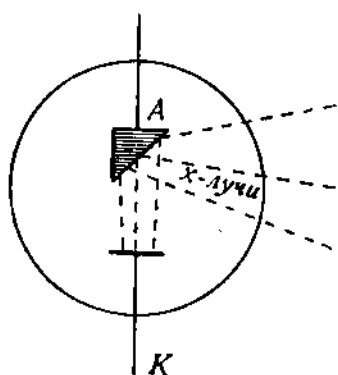


Рис. 151.

ваемое антикатодом и изготовляемое из разных веществ, например, из платины или вольфрама. Излучение X-лучей, как мы можем теперь сказать, производится ударами отдельных электронов об атомы антикатада. Электрон так мал, что его удар может затронуть лишь один атом.

Это есть основной элемент' всего явления, который можно выразить так: в момент остановки электрона у неподвижного антикатада излучаются X-лучи.

Рентгеновы лучи представляют собою свет очень большой частоты, большой не только сравнительно с видимым, но даже — ультрафиолетовым светом. В среднем, частота видимого света около 10^{15} периодов в секунду, у X-лучей — частота в несколько тысяч раз больше. Но существуют X-лучи с различными частотами; X-лучи со сравнительно малою частотою, наиболее мягкие, наименее пронизывают те тела, через которые им приходится проходить; далее идут

более жесткие и, наконец, самые жесткие, наиболее пронизывающие, наименее поглощаемые.

Опыт показывает, что, чем быстрее движутся электроны, тем более жесткие X-лучи получаются при ударе. Остановка электрона, двигавшегося с большой скоростью, представляет собою, конечно, более эффективное явление, чем торможение медленного электрона; тут отдается большая кинетическая энергия. Опыт показывает, что остановка быстрого электрона, связанная с освобождением большей энергии, сопровождается излучением света большей частоты.

Рентгенов свет непрерывно идет от антикатада, пока поток электронов ударяется об атомы этого последнего. Каждый удар производит один световой импульс. А, следовательно, естественно считать этот непрерывный свет состоящим из отдельных элементов или импульсов. Чем большую энергию представляет собой каждый импульс, тем больше, как мы только-что видели, частота или жесткость этого света. Итак, происхождение X-лучей приводит нас к выводу, во-первых, что свет может быть рассматриваем, как выпускаемый в виде отдельных импульсов, и во-вторых, что эти последние по величине своей пропорциональны частоте световых колебаний.

Изучение оптических явлений за последние десятилетия привело к выводу, что свет может излучаться атомом или молекулой только целыми порциями, „квантами“. Величина энергии такого кванта различна для света разной цветности, именно она пропорциональна частоте соответствующих световых колебаний ν ; чем больше частота, тем больше квант $= h\nu$. Постоянная h в этом выражении всегда равна $6,55 \cdot 10^{-27}$ CGS.

Электрон, ударяясь об антикатод, останавливается, и в простейшем случае вся его энергия излучается в виде одного рентгеновского импульса. Если этот импульс предполагать однородным (мономатическим) и отождествить с квантом $h\nu$, то квант должен в простейшем, крайнем случае равняться кинетической энергии остановленного электрона. Пусть рентгенова трубка работает под напряжением E между катодом и антикатодом, т.-е. на всем этом пути каждая единица (отрицательного) электричества теряет потенциальную энергию, равную $E \cdot 1$, обращая ее, например, в кинетическую; тогда электрон, к моменту своего удара, будет обладать кинетическою энергиею, равною (ср. гл. IX, § 7):

$$\frac{1}{2} mv^2 = E \cdot e,$$

т.-е. пропорциональную E ; приравниваем по вышесказанному эту энергию рентгеновскому кванту

$$\frac{1}{2}mv^2 = E \cdot e = h\nu; \quad (34)$$

формула (34) говорит нам, что частота рентгенового света возрастает вместе с E .

При измерении, E определяется соответствующим вольтметром, ν — по дифракции рентгеновских лучей в кристаллах, e берется равным $4,7 \cdot 10^{-10}$ эл.-ст. Из опытов было, например, получено: при $E = 25\,000$ вольт $\nu = 6 \cdot 10^{18}$, при $E = 37\,400$ вольт $\nu = 9,4 \cdot 10^{18}$.

Из формулы (34) следует:

$$h = \frac{E \cdot e}{\nu};$$

т.-е. из рентгенометрических измерений можно определить постоянную теории квантов h .

Реальная обстановка описываемого опыта такова: при данном напряжении E рентгенова трубка не будет давать свет только одной частоты (монохроматичный); невозможно так выкачать воздух, чтобы не осталось ни одной молекулы его, и электроны на своем пути к антикатоде могут частично, в большей или меньшей степени, терять свою энергию при случайных соударениях с оставшимися молекулами; теряют они ее и при случайном проникновении в вещество антикатада до настоящего удара в попавший на их пути атом. Все такие электроны производят свет с частотою меньшею, чем та, которая соответствует E по формуле (34); лишь те исключительные, которым до настоящего удара не пришлось потерять никакой доли несомой ими энергии, произведут частоту, соответствующую E .

Поэтому, рентгенова трубка дает много частот, целый спектр X -лучей, и лишь самый край его, с наивысшею частотою и весьма слабый по своей яркости, служит для проверки формулы (34). Отсюда происходит трудность описываемых измерений.

Все эти соображения очень важны для врача, практически пользующегося рентгеновой трубкой. Он должен понимать, что, увеличивая напряжение, под которым работает трубка, он повышает предельную частоту, повышая этим самым и среднюю жесткость X -лучей и позволяя им, поэтому, проникать глубже в тело, на которое они падают.

Для практики обычные рентгеновы трубки неудобны тем, что при повышении напряжения увеличивается не только скорость электронов, но и количество их, густота катодного потока. Одновре-

менно с жесткостью X -лучей увеличивается и их яркость. Новейшие трубки (Кулиджа) позволяют оба эти фактора изменять в отдельности, например, уменьшая скорость электронов, увеличивать их число или наоборот. Это достигается тем, что не электрическое поле между катодом и антикатодом вырывает электроны; оно служит только для придания им желаемой скорости. Электроны сами выходят из катода H , который (рис. 152) представляет собою проволоку, раскаляемую электрическим током от отдельной батареи B ; увеличивая этот ток, а с ним и накал проволоки, мы заставляем большее число электронов выходить в секунду из раскаленного катода и делаем рентгенов свет более ярким, не изменяя при этом его жесткости. Трубка Кулиджа откачивается до наивысшей степени, так что одна из причин, делающих рентгенов свет неоднородным, в значительной мере ослабляется.

В этом же направлении действует питание рентгеновой трубки постоянным напряжением. Обычно, рентгенова трубка питается индукционной катушкой или трансформатором переменного тока; в обоих случаях она получает отдельные импульсы электродвижущей силы, нарастающие от нуля и снова убывающие до нуля; следовательно, эдс не одинакова в отдельные моменты действия трубки, и электроны, производимые в разные моменты, обладают при своем ударе различными скоростями. Уже от одной этой причины рентгенов свет, по необходимости, должен быть неоднородным. В случае трансформатора переменного тока можно, помощью выпрямителей и сглаживателей, достигать хорошего постоянства вольтажа; но, конечно, проще всего, хотя и далеко не дешевле всего, питать трубку от высоковольтной батареи аккумуляторов, подбирая желаемое напряжение помощью особого переключателя, позволяющего изменять число элементов батареи. Таким образом обыкновенно и питается трубка Кулиджа; батарея высокого напряжения присоединяется к зажимам A и K рис. 152.

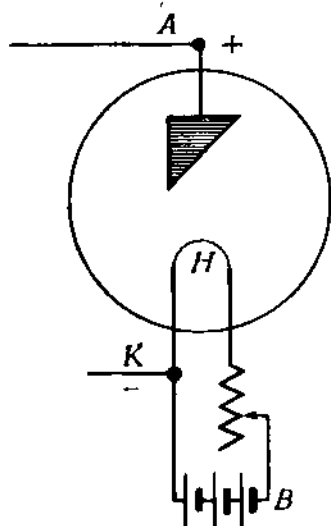


Рис. 152.

8. Фотоэффект. Изложенное в предыдущем параграфе, имеет очень большое значение. Мы объясняли, как происходят X -лучи

в рентгеновой трубке, но то, что раскрывается в основе этого объяснения, выходит далеко за пределы такого редкого, искусственного явления, как излучение рентгенового света, требующее разреженного пространства, высокого напряжения и всех соответственных приспособлений.

Мы видели, что существует замечательное соотношение между кинетической энергией электрона, затормаживаемого на антикатоде, и частотой излучаемого света.

Естественно является вопрос не оправдывается ли вышеупомянутое положение и в обратном направлении; если электрон, отдавая свою кинетическую энергию атому, вызывает соответственные кванты света, то не могут ли кванты света, попадая в атом, приводить в движение электроны? Именно такое явление и представляет собою фотоэффект (стр. 258).

Явление это было открыто случайно (1887 г.), когда еще не были даже известны X -лучи.

Явление фотоэффекта подчиняется двум главным законам: 1) Тело, освещаемое светом, выбрасывает тем больше электронов в секунду, чем ярче свет. Нельзя не согласиться, что это совершенно понятно. 2) Электроны, выбрасываемые телом при фотоэффекте, имеют при самом своем выходе определенную скорость, которая тем больше, чем больше частота подающего света. Следует вдуматься в это странное соотношение. Свет с большой частотой может быть чрезвычайно слабым по своей яркости; он будет тогда причинять выход очень малого числа электронов в секунду, но начальные скорости их будут велики. При освещении светом во много раз более ярким, но с меньшей частотой, мы получим с поверхности тела много электронов в секунду, но обладающих малою начальною скоростью. Мы говорим пока о начальной скорости, о скорости выхода электрона; на дальнейшем пути мы можем, разумеется, управлять скоростью электрона, увеличивать или уменьшать ее, создавая на его пути соответственное электрическое поле. Это уже не относится к фотоэффекту.

Второй закон фотоэффекта удивителен; но он получает простое разъяснение, если предположить, что энергия кванта света распространяется в пространстве в сосредоточенном виде. Каждый квант при встрече с атомом отдает свою энергию одному электрону. При большой частоте эта энергия больше, и электрон получает большую кинетическую энергию.

Проверка этого закона производится следующим образом. Против металлической пластинки, на которую падает какой-либо одно-

родный свет с определенной частотой, помещается вторая, собирающая на себя электроны, как это изображено на рис. 146. Если хотят измерять число электронов, испускаемых освещенною пластинкой (поверка 1-го закона), то напряжение включается, как указано на этом рис. 146. Для проверки же второго закона знаки полюсов генератора обращаются: освещаемая пластинка заряжается (+), противостоящая ей (—); этим производится поле, мешающее двигаться электронам. Напряжение E подгоняют таким, чтобы ток как раз только-что был прекращен. Это будет означать, что электроны едва лишь не достигают противоположной пластины, т.-е., что их кинетической энергии как раз только хватает на преодоление электрических сил вдоль всего поля. Иначе говоря, она вся обращается в потенциальную у самой поверхности отрицательной пластины. Значит, мы можем сказать, что эта потенциальная энергия, равная Ee , равна кинетической энергии $\frac{1}{2}mv^2$ вылета электрона. Если эта последняя определяется квантом, то верно уравнение:

$$h\nu = \frac{1}{2}mv^2 = Ee.$$

Действительно, в опытах, например, с литиевою пластинкою, освещавшеюся однородными линиями ртутного спектра, получилось, что при одной линии с $\nu = 0,9 \cdot 10^{15}$ напряжение, останавливающее ток, равнялось 0,1 вольт, при другой линии $\nu = 1,18 \cdot 10^{15}$, $E = 1$ вольту. Мы видим, что вольты, а значит, и скорость вылета электрона растут вместе с ν . (E и ν не были пропорциональны вследствие особых условий опыта). Из этих блестящих измерений опять было вычислено h ; с опытами над литием получилось $h = 6,58 \cdot 10^{-27}$, с натрием — $6,57 \cdot 10^{-27}$ (CGS).

Для каждого тела существует наименьшая световая частота, которая еще может производить фотоэффект. Это показывает, что в поверхностном слое тела имеются условия, мешающие выходу электрона; поэтому всякий свет, квант которого не в состоянии придать электрону энергию, достаточную для преодоления этой помехи, уже не может произвести фотоэффекта (2-ой закон). Наблюдение минимальной частоты для получения фотоэффекта может служить необыкновенно точным способом определения состояния поверхности тела; малейшие примеси и проч. заметно изменяют эту частоту.

У фотоэффекта много общего с контактной разностью потенциалов. Сильно электроположительные элементы (легко отдающие электроны см. § 10), которые при контакте с другими телами заряжаются (—)

особенно легко поддаются фотоэффекту, как, например, щелочные металлы. Минимальная частота для них особенно мала. Многие авторы приписывают в обоих явлениях, и фотоэффекта, и контактной разности потенциалов, большое значение состоянию поверхности, разумея при этом не только действительную поверхность тела, но и приставший к ней (окклюдированный) газ из окружающей атмосферы. Окончательно решить этот вопрос чрезвычайно трудно, так как почти невозможно очистить поверхность тела до ее нормального состояния, хотя бы даже и применяя высокий накал в наиболее совершенной пустоте.

Из практических приложений фотоэффекта особенно часто встречается фотоэлемент; это стеклянный запаянный сосуд, наполненный гелием или аргоном при малом давлении; часть K его внутренней поверхности (рис. 153) покрыта, например, амальгамой рубидия, с кото-

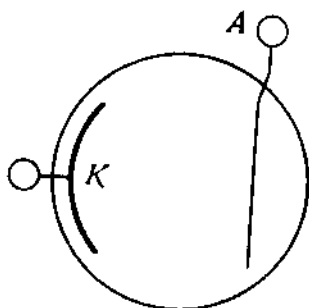


Рис. 153.

рой соединен выходящий электрод K ; против нее впаян электрод A в виде проволоочки. Освещение амальгамы вызывает ток, который измеряется достаточно чувствительным (10^{-8} ампера) гальванометром; напряжение батареи 100 — 200 вольт.

Подобным прибором можно сравнивать яркости источников света (1-ый закон). При более чувствительном гальванометре можно измерять яркость света от звезд 9-ой величины и ее колебания, не обнаруживаемые никаким другим способом. Различные способы, предлагаемые изобретателями для передачи изображений на расстояние, основаны на применении фотоэлемента: отдельные точки предмета, будучи проэктируемы на фотоэлемент, производят токи, сила которых соответствует яркости этих точек. Токи передаются по проводам или служат к подаче радиосигналов, а на приемной станции помощью обратного превращения электрической энергии в световую получают световые точки соответствующей яркости.

Светочувствительность селена, получающего под действием света сравнительно большую проводимость, может быть объясняема фотоэффектом: из молекул селена выделяются электроны, служащие переносу электричества внутри селена, как внутри проводника (§ 13).

В грандиозных размерах фотоэффект производится лучами солнца, отнимающими в верхних слоях атмосферы у высоко стоящих обла-

ков (ледяные кристаллы) электроны и делающих, таким образом, эти слои положительно заряженными.

Фотоэффект X -лучей особенно силен (2-ой закон) в смысле большой скорости вылетающих электронов, образующих „вторичный“ катодный поток. Ему подчиняются и газы, что и объясняет ионизацию газов под действием X -лучей. Помощью фотоэффекта вообще можно разрядить только отрицательно заряженное тело; но при действии X -лучей также легко снимается и положительный заряд, если разряжаемое тело находится, например, в воздухе; $(+)$ заряд снимается $(-)$ ионами газа, образующимися под действием X -лучей.

9. Свечение атома. Общее квантовое положение, которым связывается излучение света с внезапным изменением в движении электрона, распространяется и на обыкновенное свечение тел.

Мы говорили уже (стр. 260) об атомной „планетной“ системе и указывали, что вращение электронов вокруг атомного ядра и представляет собою излучение света; но эта последняя мысль, которую так хорошо объяснялось явление Зеемана (стр. 261), в настоящее время оставлена; она заключает в себе противоречие. Действительно, атом, ведь, не всегда испускает свет; он должен быть возбужден к свечению, например, ударами при тепловом движении молекул или электрическими силами. Если же вращение электронов есть свечение, то с прекращением свечения электроны останавливаются, а тогда, по законам механики, они падают на ядро, т.-е. вся атомная система разрушается. Такого явления, конечно, не существует.

И в прежнем представлении об излучении света приходилось предполагать, что для электронов атома каждого данного вещества существуют определенные орбиты вращения, как и для планет солнечной системы, определенные „годы“ вращения, т.-е. частоты, так как, например, газы при своем свечении испускают характерные для каждого элемента линейчатые спектры строго определенных частот. Определенные орбиты остаются и в современном квантовом учении об излучении света. Но не плавное движение по ним электронов вызывает свет; электрон должен быть выдернут со своей орбиты для возбуждения излучения. Если он при этом вышел из пределов атома, то произошел фотоэффект; если же он только переведен на какую-либо более далекую от центра орбиту, т.-е. стал обладать большею потенциальною энергиею, то произошло простое поглощение света: световая энергия обратилась в потенциальную электрическую. В системе вращающихся вокруг ядра электронов суще-

ствуется известное механическое равновесие всех кулоновских сил (взаимодействие электронов между собою и с ядром) и сил центробежных. Снятие электрона с его орбиты нарушает это устойчивое равновесие, и потому дает возможность тому или другому электрону занять освободившееся место. Теперь уже с одной из внешних орбит произойдет перескок на более внутреннюю; это сопровождается уменьшением потенциальной энергии; она превращается в световую.

Таким образом, теория квантов резко отделяет движение динамически устойчивое (вращение электронов), которое определяет планетарную систему атома, от тех внезапных возмущений, которые производят свет.

Теория квантов принимает, что энергия, выделенная при перескоке на какую-либо более внутреннюю орбиту, всегда равна кванту которой-нибудь из частот, имеющихсЯ в спектре данного атома.

На основании законов механики и этого квантового предположения возможно построить всю сеть электронных орбит данного атома. Но при данной сети орбит все перескоки уже даны, т.-е. весь линейчатый спектр оказывается предсказанным. И вот этот предсказанный спектр получается, правда, лишь для самых простых тел, водорода и гелия, совпадающим с тем, что дает опыт, до малейших деталей и с необычайной точностью. Величины h и e , появляющиеся, конечно, во всех этих подсчетах, берутся такими, какими они вычисляются из разнообразнейших наблюдений; два примера таких вычислений были приведены выше.

Таким образом, электронная теория в соединении с квантовой сильно продвинула нас к научному идеалу — единству и целостности знания; она подвела механическое мировоззрение к внутреннему миру атома.

Теория квантов предложена Планком и была им впервые обнародована 14 дек. 1900 г.

10. Строение атома. И по более старому учению, и по теории квантов, атом представляет собою положительно наэлектризованное ядро с вращающимися вокруг него электронами. Атом, как целое, признается телом электрически нейтральным, т.-е. отрицательный заряд всех его электронов должен быть равным положительному заряду ядра. Это как бы конденсатор, все силовые линии которого находятся внутри; он не имеет внешнего электрического поля.

Различными действиями на атом, например, ударом электрона, он может быть лишен одного или нескольких из своих электронов; тогда он обнаруживает электрическое поле, становится ионизованным.

Все химические элементы, будучи расположены по возрастающему атомному весу, обнаруживают повторяемость химических, а также и физических свойств. Этот периодический закон был установлен Менделеевым (1873 г.).

Чтобы выдержать строгую периодичность свойств, пришлось, однако, в нескольких местах системы элементов пожертвовать возрастанием атомного веса, элемент с большим атомным весом пришлось поставить раньше элемента с меньшим. Правда, таких случаев немного (4 из 91), и атомные веса этих элементов очень близки друг к другу, но всё же эти случаи показывают, что, если периодичность — самое главное, то систематическое возрастание атомного веса — необязательное явление. Атомный вес не есть основной признак химических элементов. Менделеев положил в основу своей системы атомный вес, потому что в то время не было другого, более основного понятия.

Менделеев тщетно искал объяснения той широкой картины, которую представляет его таблица элементов: одно свойство неизменно возрастает, а все другие изменяются периодически; нарастают до максимума, затем быстро падают до минимума, чтобы снова расти к максимуму (как зубцы пилы). Объяснение этого дала электронная теория своим учением об ядре и электронах.

Можно произвести такой опыт: на поверхности воды, налитой в сосуд, на поплавке держится вертикально поставленный магнитик, обращенный кверху, например, северным полюсом. Последовательно один за другим пускают плавать на воде такие же магнетики на поплавках, но обращенные кверху своими южными полюсами. Они все, отталкиваясь друг от друга и притягиваясь к центральному магниту, образуют вокруг него кольцо, пока их не набралось, например, четыре; при дальнейшем увеличении их числа мы заметим образование второго кольца и т. д. Если смешать всю эту систему, взболтав воду, то, когда волнение успокоится, мы увидим всю картину восстановленною. Это статическое расположение магнитиков дает некоторый намек на то, что происходит в гораздо более сложном случае динамической планетной системы атома.

Все химические элементы различаются между собою по (+) заряду своего атомного ядра, а, следовательно, согласно предыдущего положения об электрической нейтральности атома — по числу электронов, окружающих ядро. С возрастанием этого числа сперва образуется одна группа электронов; положим, что она может заключать в себе не больше 8 электронов. С дальнейшим возраста-

нием (+) заряда, новые электроны размещаются уже в следующей, „более внешней“ группе и т. д.

Пока образуется одна группа, вещество переходит все стадии одного периода менделеевской системы; пока в этой группе еще мало электронов, вещество электроположительно, т.-е. легко отдает плохо прикрепленные электроны, как Li, Be, B в первом периоде, Na, Mg, Al — во втором и т. д. Когда группа близка к своему завершению — вещество электроотрицательно, т.-е. жадно добывает недостающие ему электроны (N, O, F; P, S, Cl). Это и является основой химических свойств элемента; мы видим, что они всецело зависят от состояния внешней группы. В конце каждого периода имеется тело со вполне сформировавшейся внешней группой, безразличное к электронам и химически бездеятельное, как неон, аргон, криптон.

Число 8 не имеет пока механического обоснования; его подбирают по числу элементов в периоде менделеевской системы; химия указывает, как разрешается в природе механическая задача, неразрешимая для нашей механики.

Простейший элемент, водород — с одним электроном в атоме и соответственным единичным зарядом ядра. Задача о такой системе разрешима; с помощью теории квантов точно определяются „дозволенные“ орбиты электрона и, как мы уже упоминали, все частоты спектра.

Далее идет гелий с двойным зарядом ядра и двумя электронами. Эта задача оказывается пока неразрешимой. Ионизованный гелий представляет собою опять простой вопрос: здесь опять один электрон, и отличие от водорода только в том, что ядро притягивает его более сильно.

Литий стоит на третьем месте; он должен быть дважды ионизован, чтобы подойти под законы водорода. Дальше дело усложняется еще больше; не только усложняется первая группа, но появляется вторая и т. д.

С приближением к ядру электрическое поле его становится всё сильнее, потенциальная энергия всё быстрее падает; перескоки на внутренних орбитах сопровождаются особенно большим выделением энергии, производят большие кванты, большие частоты; атом излучает при этом рентгенов свет. Если мы получим перескоки на самое внутреннее кольцо, мы заставим атом излучить самые жесткие лучи, какие только возможны для данного вещества. Какая именно частота должна быть при этом ожидаема, это может быть предсказано: ведь, электроны внутреннего кольца находятся непо-

средственно перед своим ядром, как электроны водородного атома; следовательно здесь получается тот же закон, что и для водородных частот с тем лишь изменением, какое соответствует усилившемуся притяжению к ядру.

Для того, чтобы происходили перескоки на внутренние орбиты, необходимо, чтобы с них были выдернуты какие-либо электроны. Для этого испытуемое вещество помещается, как антикатод, в пустотную трубку и подвергается действию катодного потока. Катодный поток производит в этом случае два рентгеновских излучения: один, определяемый остановкой электрона, выражающий энергию его движения; другой, происходящий от того, что какой-либо электрон катодного потока выбил электрон атома с внутренней орбиты и этим, как было объяснено в § 9, дал возможность другому атомному электрону занять освободившееся место.

Наблюдения над 60 элементами показали, что все эти тела дают X-лучи с тою именно частотою, какая следует из формулы для водорода, если только в нее вместо одиночного заряда в ядре подставить больший, тем больший, чем ближе мы подходим к концу менделеевской системы, при чем, при переходе от элемента к элементу, приходится прибавлять в точности по одному $+\epsilon$ заряду водородного ядра.

Согласно принципиального положения, указанного в начале этого параграфа, о необходимой электрической нейтральности всякого атома мы должны теперь сказать, что при построении менделеевской системы, переходя от элемента к элементу, мы действительно должны прибавлять по одному электрону. Следовательно, всё наше представление о последовательном нарастании числа электронов на один при продвижении по менделеевской системе оказывается верным.

Итак, истинным основным свойством всех элементов, по которому они должны быть расположены для получения периодического закона, является заряд ядра; так как этот заряд без перерывов (скачков) и без повторений увеличивается каждый раз на единицу, то он, выраженный в заряде водородного атома ($+\epsilon$), численно равняется № элемента в менделеевской системе.

Те пары элементов, в которых атомный вес оказывается не возрастающим, но падающим, являются верно поставленными по нарастанию заряда ядра.

Рентгеновы лучи, испускаемые телами, называются характеристическими лучами. Их существует несколько сортов, по всей вероятности — четыре. Когда электрон проскакивает на самую внутрен-

ную группу, получается наибольшая частота, о которой мы говорили, называемая *K*-частотой. Вторая группа, считая от ядра, дает начало менее жестким *L*-лучам. Расчет их частоты уже несколько сложнее. Электроны второй группы не находятся непосредственно перед ядром; ядро отчасти заслонено электронами первой группы. Тем не менее, теория может еще предсказать частоту *L*-лучей; необходимо лишь вычесть из полного заряда, или из *№* элемента число 7. Далее идут *M*-лучи, как результат проскоков на третью орбиту, а затем, может-быть, *N*-лучи, которые по своей чрезвычайной мягкости весьма трудно наблюдаемы.

Лучи *K*, *L* и *M* в свою очередь состоят из нескольких частот, так как, например, на первую орбиту можно проскочить и со второй, и с третьей и т. д.

Во всех случаях этих перескоков выделение энергии тем больше, чем более заряжено ядро; поэтому *K*-лучи элементов с большим *№* наблюдать очень трудно по их необычайной жесткости: их трудно чем-нибудь поглотить, они всё пронизывают; наоборот, *M*-лучи можно еще наблюдать лишь при больших *№№* элементов, так как при малых *№№* они так мягки, что поглощаются небольшим слоем разреженного воздуха.

Приведем некоторые частоты *K*-лучей: *Zn* (*№* 30) $2 \cdot 10^{16}$; неодим (*№* 60) $9 \cdot 10^{16}$; вольфрам (*№* 74) $14 \cdot 10^{16}$.

Для того же вольфрама частоты *L*- и *M*-лучей: $2 \cdot 10^{15}$; $4 \cdot 10^{17}$.

Чем более удаленную от ядра группу мы возьмем, тем менее значительны перескоки на него (по выделяемой при этом энергии); частоты всё уменьшаются, и мы входим в область излучения света. Таким образом, внешние орбиты, которыми, как мы видели, определяются химические свойства, определяют и световые частоты, спектр вещества, чем и пользуется спектральный химический анализ.

Динамика явлений на внешних кольцах столь сложна, что теоретическое предугадание здесь уже совершенно невозможно даже для *№* 3 (литий). Только благодаря наблюдению рентгеновского света наука могла наметить электронную теорию строения атома во всей ее полноте.

Электронная теория дает свои объяснения с помощью понятия об электроны; всё, что имеется в физическом мире помимо электронов, ее ведению и объяснению не подлежит. Атомное ядро, поскольку оно заключает в себе что-то другое, положительное электричество и материю, остается непонятным. Можно лишь отметить, что отождествить положительное электричество с материей мы не имеем

оснований; эти два количества не выходят одинаковыми. Так, например, ядро гелия (№ 2) состоит из 4-х атомных ядер водорода, но имеет в себе всего два водородных заряда; ядро вольфрама (№ 74), состоящее из 184 водородных ядер, несет в себе 74 заряда; для последнего элемента менделеевской системы, урана (№ 92), эти числа суть 238 и 92.

II. Радиоактивность. Применив обычную нашу механику к атому, хотя и с прибавлением теории квантов, видя в конечном идеале возможность дать какую-то модель атома, как некое действующего, устойчивого механизма, мы впадаем в противоречие с явлением радиоактивности. Это явление состоит в том, что атомы химических элементов, — особенно это относится к тяжелейшим атомам тория и урана, — распадаются сами по себе. Число атомов, подвергающихся распаду за единицу времени, зависит, во-первых, от самого вещества и, во-вторых, от количества этого радиоактивного вещества, имеющегося в данный момент налицо; пока количество радиоактивного вещества велико, оно распадается быстро; с убылью вещества падает скорость его распада. Поэтому нельзя измерять радиоактивность скоростью распада; эта скорость изменяется для одного и того же вещества. Радиоактивность измеряют временем, за которое масса вещества убывает до половины, и которое называется „продолжительностью жизни“. Для тория это время равно $22 \cdot 10^9$ лет, для урана — в 5 раз меньше, а для радия в 14 миллионов раз меньше.

Радиоактивность не есть то, что обыкновенно называется химическим превращением; это последнее зависит от тел, с которыми данное вещество соприкасается, от температуры и проч. Радиоактивность есть превращение атома в другой, меньшего атомного веса; оно не может быть ни замедлено, ни ускорено никакими внешними условиями или изменениями физического состояния вещества. Превращение это носит бурный характер; ненужные для нового атома осколки прежнего выбрасываются, вообще говоря, с большой энергией, образуя лучи как вещественные, так и световые. По этим-то лучам и была открыта радиоактивность, по ним же производится и точнейшее ее измерение.

Лучи радиоактивных тел бывают трех родов: 1) α -лучи, оказавшиеся вещественными, а именно положительно заряженными атомами гелия; в виду того, что эти атомы не нейтральны, а каждый несет на себе по $+2e$, следует называть их дважды ионизованными атомами гелия. Их скорость часто бывает огромною, что при их значительной по сравнению с электроном массе делает их самыми

разрушительными снарядами, какие только существуют в мире атомов. Скорость α -частицы и отношение ее заряда к массе определяются обычными способами, например, по методу скрещенных полей (§ 4).

2) β -лучи представляют собою катодный поток, но, обычно такой быстроты, какую в пустотной трубке можно было бы получить только помощью очень высокого напряжения.

3) γ -лучи ультрарентгенового типа. Их частота больше частоты самых жестких X -лучей. Так как γ -лучи появляются при радиоактивном распаде почти всегда совместно с β -лучами, то можно предположить, что они производятся внутри радиоактивных тел атомами, не подвергшимися распаду, от ударов по ним β -лучами распадающихся атомов (внутренний обратный фотоэффект).

Общая картина распада такова. Уран пятью степенями превращений, т.е. через четыре промежуточных радиоактивных тела, превращается в радий, который через девять ступеней превращается в свинец. Торий десятью степенями превращается в свинец. Распад оканчивается на свинце, как элементе совсем не радиоактивном, или, по крайней мере, чрезвычайно медленно распадающемся (необычайно устойчивая система).

На пути распада урана имеется 8 превращений с вылетом α -частиц; вследствие этого атомный вес из уранового ($238,2$) превращается в $238,2 - 4 \times 8 = 206,2$, что и представляет собою атомный вес свинца. При каждом превращении, сопровождающемся вылетом α -частиц, вещество переходит на два номера выше по менделеевской системе, так как ядро его атома теряет $+2e$. Кроме того от урана до свинца происходит 6 превращений с излучением β -и γ -лучей; эти превращения вызывают ничтожное изменение атомного веса, но интересны тем, что каждое такое превращение переводит тело не вверх по таблице Менделеева, а на одно место вниз, к большим атомным весам. Это происходит потому, что электроны, образующие β -лучи, вылетают не из колец атома (это был бы фотоэффект), а из его ядра и тем выявляют один новый положительный заряд этого ядра. Номер ядра повышается на единицу; здесь неожиданно раскрывается сложность состава ядра: оно может иметь кроме явных $+e$, нейтрализуемых электронами на орбитах, еще, может-быть, много неявных, нейтрализованных внутриядерными электронами. Не нужно удивляться, что элемент, потерявший электрон из ядра, т.е. уменьшивший, хотя и на весьма малую долю, свой атомный вес, продвигается на место с большим номером; мы знаем, что увеличение атомного веса не всегда сопрово-

ждает нахождение элемента на месте более близком к концу периодической системы (стр. 273).

Таким образом распад радиоактивного тела не представляет собою передвижения по менделеевской системе в одном направлении — всё к меньшим номерам; таково общее направление, но оно прерывается скачками назад к номерам большим.

12. Положительные лучи. В пустотной трубке, в которой производится катодный поток, могут быть наблюдаемы лучи, идущие (Гольдштейн, 1886) от катода не к аноду, но в обратную сторону; если катод имеет вид пластинки, то для получения этих лучей в нем проделываются отверстия. По направлению движения этого второго потока заключают, что он составлен из положительно заряженных телец; действие, оказываемое на этот поток магнитным и электрическим полями, подтверждает это заключение. Изучение положительных лучей обыкновенно производится таким образом: на флуоресцирующем экране, на котором они производят яркое пятнышко (или на фотографической пластинке), измеряют смещение конца положительного потока под действием известных полей; назовем смещения: x — для электрического, y — для магнитного. Механика показывает, что

$$x = k \frac{Xe}{mv^2}, \quad y = k' \frac{He}{mv},$$

где e , m , v означают заряд, массу и скорость каждого тельца положительного потока, k и k' суть коэффициенты, зависящие от длины потока и вообще от устройства пустотной трубки.

Измерения показывают, что положительные лучи образуются атомами, или молекулами, в той или иной степени ионизованными, того тела, следы которого находятся в трубке. Метод положительных лучей дает, таким образом, способ измерять массу непосредственно атома или молекулы. Можно себе представить, до какой степени важно „дотронуться“ до этих основных элементов материи, на представлении о которых строилось всё физико-химическое знание за последние сотни лет.

Виртуозность современных экспериментаторов в таком „дотрагивании“ поразительна; конечно, всё основано на действии электрического и магнитного полей; понимание этих приемов требует, однако, значительных сведений по механике и математике.

Одним из главнейших результатов является объяснение того, что атомные веса некоторых элементов не представляют собою кратных целых чисел атомного веса водорода, а они должны быть

такими, если атомы всех тел состоят из гелиевых ядер (§ 10). Оказывается, что у этих элементов атомы не одинаковые, а разные: атомные веса всех этих разных атомов одного и того же элемента (изотопов элемента) суть кратные атомного веса водорода; но химия знает только их определенную смесь и определяет средний атомный вес, который, конечно, может оказаться дробным числом.

13. Металлическая проводимость. При объяснении тока через газы электронная теория пользуется идеей о расщеплении атома. Для теории металлической проводимости этого не нужно, так как металл проводит ток под напряжением сколь угодно малым и без помощи особых диссоциирующих агентов и роде тепла или X -лучей; здесь электронная теория воспользовалась идеей о свободных ионах, которую Аррениус применил к объяснению проводимости растворов солей.

Металл наполнен свободными электронами, как неким газом; это находится в соответствии с тем, что металлы суть электроположительные элементы (стр. 274), атомы которых легко отдают электроны со своего внешнего кольца; электроны в металлах некоторую долю своего общего числа диссоциированы. Эти свободные электроны, постоянно сталкиваясь с молекулами, участвуют, как упомянуто на стр. 259, в их беспорядочном, тепловом движении со средней скоростью v , зависящей от абсолютной температуры T ; $v = k \sqrt{T}$.

Когда электрическое поле входит в металл (фарадеевское представление тока стр. 195), его силовые линии разбиваются на участки между частицами металла, длиной l , образующие конденсаторы молекулярных размеров. Тогда у электронов к их скорости беспорядочного движения прибавляется однообразная у всех скорость против силовых линий, величиною u . Если электрическое поле действует с силою X на единицу электричества, т.-е. с силою Xe — на электрон, и если этот последний находится под действием поля в течение времени t , то (импульс силы = количеству движения):

$$Xet = mu.$$

Пусть X не велико, а потому u мало в сравнении с v ; тогда t есть время пробега электрона по его свободному пути l со скоростью v (прибавкою u — пренебрегаем); т.-е. $t = \frac{l}{v}$. В этом случае

$$Xe \frac{l}{v} = mu.$$

Но по формуле (33) $i = Nzeu$, где N — число электронов в единице объема. Следовательно

$$i = \frac{Nz^2}{vm} \cdot XI = \frac{Nz^2}{vm} \cdot E; \quad (35)$$

XI есть работа поля над единицей электричества на пути l , т.е. разность потенциалов E в этом участке. Это и есть закон Ома. Множитель при E есть выражение проводимости металла по электронной теории при единичном сечении и длине $= l$. Удельная проводимость (на ед. длины) получает отсюда выражение:

$$\frac{Nz^2 l}{vm}.$$

Если X так велико, или v (т.е. T) так мало, что v ничтожно в сравнении с u , то мы должны считать $i = \frac{l}{u}$. В этом случае

$$i = \frac{N e^2}{V m} V E.$$

Эта формула, показывает, что при очень больших напряжениях или очень низких температурах ток возрастает медленнее, чем вольты, т.е. не по закону Ома.

При столкновении электронов с частицами металла, электроны отдают частицам всю энергию, полученную ими в электрическом поле; таким образом происходит джоулево нагревание.¹⁾

Последними словами мы заканчиваем все то представление об электрическом постоянном токе, которое дается содержанием настоящей книги. Мы видим, что существует момент в этом процессе, когда проводник заряжен, содержит внутри себя электрическое поле, разбившееся на участки между соседними молекулами, которое затем исчезает, тратя свою энергию на движение электронов (стр. 197). Статический заряд проводника может находиться только на его поверхности; статическое электрическое поле начинается с поверхности проводника и не заходит вглубь его; то, вторгающееся вглубь проводника, электрическое поле, которое необходимо нам для объяснения джоулева тепла, есть поле динамическое.

¹⁾ Столкновение электронов с молекулами без электрического поля не сопровождается передачей энергии электронов молекуле, так как оба движения беспорядочные и помощью этих столкновений приводятся только к равновесию.

Так происходит при вторжении постоянного электр. поля в металл; если же поле переменное, колебательное, как в луче света, то может случиться, что электрон не успеет пройти своего свободного пути, встретиться с частицами металла, как уже электрическая сила изменит свое направление. Электрон получит обратное ускорение и будет вообще колебаться перпендикулярно лучу, не отдавая своей энергии металлу, но передавая электромагнитные волны вдоль луча. Металл превращается в изолятор.

Опыт, действительно, показывает, что металлы далеко не так сильно поглощают лучи света коротких периодов, как это следовало бы по их электрической проводимости.

Электронная теория предполагает, что те же электроны служат и передатчиками тепловой энергии по металлу: более быстрые, находящиеся в месте с более высокой температурой, при встрече с более медленными отдают им свой избыток энергии, который затем передается и частицам более холодного места металла. Здесь электронная теория вторгается в учение о тепле, как (мы видели это выше в § 9) вторгается она и в учение о свете.

Все эти положения электронной теории приводят к следующим шести выводам.

1. Сопротивление металла должно увеличиться с повышением его температуры [увеличивается ν форм. (35)].

2. Если перпендикулярно к проводнику, по которому идет ток, возбудить магнитное поле, то пути электронов искривятся, время, за которое они проходят свой свободный пробег l , увеличится и ток уменьшится (ср. стр. 92).

3. При этом электроны будут отклонены к одной стороне поверхности проводника, которая, следовательно, окажется заряженной отрицательно, а противолежащая — положительно.

4. Теплопроводность и электропроводность, зависящие отчасти от одних и тех же величин, как, например, N , должны быть обе велики или обе малы в металлическом теле (стр. 39).

5. Существование теплового тока в металле должно сопровождаться переносом электричества, так как тепловая энергия переносится в определенном направлении электронами, имеющими, значит, при таком процессе теплопроводности преимущественное направление скорости, которое и есть электр. ток.

6. При существовании теплового тока в металле магнитное поле перпендикулярное к нему производит противоположные заряды на

противолежащих частях его поверхности, подобно пункту (3) относительно электрического тока.

Все эти явления не были предсказаны электронной теорией, так как были известны из опыта раньше ее возникновения. Но только с помощью электронной теории с такою простотою понимается связь между ними и делаются попытки точного установления их закономерности.

Такова электронная теория тока, возникшая после вековой работы науки над этим явлением. Помощью представления об электрическом „газе“, электронах, все, добытое в XIX в. (стр. 195), завершается в полную картину; становится понятным джоулево нагревание, в которое обращается энергия электрического поля.

Электрический ток остается циркуляцией электричества; но каждый электрон не проходит всю цепь насквозь, а участвует в этой циркуляции лишь в границах своего свободного пробега, между двумя частицами.

Изложенная теория проводимости, основывающаяся на представлении об электронах, как газе, недавно была общепринятою, но за последние годы делаются попытки придать ей другую форму, более соответствующую современным данным об отношении между тепло- и электропроводностью, о теплоемкости тел, и ближе связанную с излучением света раскаленными телами, которое, как мы видели, тоже оказывается электронным явлением.

Д. Д. Томсон предполагает, что эдс, как электрическое поле, направляет молекулы проводника, которые предполагаются заряженными на своих концах двумя знаками электричества. Вследствие этого они выбрасывают электроны, непрерывно подходящие к ним, приблизительно в одном направлении. Это и есть ток под известной эдс. Ориентировка молекул становится строже при увеличении этой силы, а также при понижении температуры, когда междучастичное движение представляет ей меньшую помеху. Рассуждение вполне аналогичное теории элементарных магнитов. При очень низких температурах молекулярное электрическое поле самих выстроившихся в ряды молекул достаточно, чтобы удерживать каждую из них в ее определенной ориентировке. Тогда электроны выбрасываются от молекулы к молекуле все в одном направлении, без содействия посторонней эдс. Она необходима только для начала такого тока. Этим объясняется механизм супрапроводности.

14. Принцип сохранения электричества в электронной теории принимает своеобразную форму. Электричество отрицательное, со-

стоящее из атомов, особенно легко представляется не могущим ни исчезнуть, ни возникнуть ни в малейшем количестве, потому что и исчезновение, и возникновение электронов пришлось бы воображать происходящим сразу по целым электронам (что невозможно) или допустить возможность каких-то эмбрионов и осколков электрона. Таким неисчезающим представлялось и количество всякого химического элемента, пока считали, что элементы состоят из своих сплошных неизменных атомов. Но атомы элементов признаются в настоящее время сложными, а соответственно этому элементы — превращающимися и изменяющимися в своем количестве даже за время геологической истории земли. Их место и смысле однообразного, однородного, сплошного „кирпича мироздания“ именно и заняли в наших представленных электроны.

15. Контактная разность потенциалов. Металлы наполнены электронным газом с различной упругостью; этим они отличаются друг от друга. Это является одною из причин различия в их электрическом сопротивлении. Если два металла привести в соприкосновение, их электронные атмосферы должны притти в равновесие; при этом более упругая сожмет атмосферу второго металла, характеризуемого меньшею упругостью электронов, и, следовательно, частью войдет в него; первый обеднеет электронами, наэлектризуется (+), второй будет ненормально изобиловать ими (—). Так объясняется явление, открытое Вольтою; и если вести это рассуждение дальше, то окажется, что из проводимостей и из уменьшения их под магнитным полем (§ 13, 2), вероятно, возможно будет *предвычислить* знаки электризации при соприкосновении данных двух металлов и их разность потенциалов; и проводимость, и увеличение сопротивления под магнитным полем зависят от числа электронов в единицу объема N и от их беспорядочной скорости v ; от этих именно величин зависит и упругость электронного газа (стр. 269).

16. Магниты, по электронной теории, состоят из атомов, электроны которых вращаются приблизительно в одной плоскости и почти все в одном направлении.¹⁾ Это, конечно, и есть амперовская теория элементарных магнитов, но в ней очень просто решается вопрос, почему (стр. 192, 129) не происходит джоулева нагревания: здесь электроны движутся по инерции и не сталкиваются с частицами. Магнитное поле поворачивает эти соленоиды, как в явлении Зее-

¹⁾ Как это приблизительно имеет место относительно планет нашей солнечной системы

мана (стр. 261), и, таким образом, намагничивается парамагнитное тело; поток увеличивается, потому что ко внешнему полю прибавляется поле элементарных соленоидов.

В диамагнитном теле вращение электронов *возникает* с возникновением внешнего поля; это частный случай явления электромагнитной индукции. Индуцированный ток (вращение электронов) имеет такое направление, что мешает внешнему полю. По инерции это движение электронов сохраняется, и таким образом диамагнитное тело ослабляет внешний поток.

Здесь полезно отметить, что осторожная научная мысль требует прямой проверки того положения, что движущийся заряд производит магнитное поле, как электрический ток; из всей суммы знаний об электричестве очевидно, что электрон, двигаясь вместе со своим полем, должен возбуждать магнитное поле поперек своих силовых линий и своего движения (положение 1 стр. 195); косвенно это доказывается действием магнита на катодный поток, как на ток, явлением Зеемана и бесчисленным множеством выводов электронной теории; несмотря на все это, был сделан целый ряд попыток доказать это непосредственно.

Схема опыта (опыт Роулэнда) заключается в том, что два диска *A* и *B* (рис. 154), образующие конденсатор, приводятся в быстрое вращение в противоположных направлениях; подвешенная между ними аstaticкая система стрелок должна при этом отклониться, как будто она находится под влиянием тока, текущего по направлению вращения диска *A*. В последнее время (А. А. Эйхенвальд в Москве, 1903 г.) опыт дал результаты, вполне согласные с теоретическими ожиданиями.

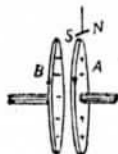


Рис. 154.

17. Масса и скорость. Мы только-что сказали, что движущийся электрон возбуждает магнитное поле, напряжение которого пропорционально скорости движения электрического поля. Этот магнитный поток представляет собою запас энергии, и эта энергия увеличивается вместе со скоростью электрона и убывает, когда его скорость уменьшается. В движущемся электроне вместо обычной кинетической энергии тела, которое движется, имеется вне его электромагнитная энергия или, как обыкновенно выражают это явление, — вместо обычной массы и инерции имеется электромагнитная масса и инерция.

Эта электромагнитная масса, проявляющаяся при движении, зависит от скорости электрона; она уменьшается, когда электрон останавливается.

Первоначальные опыты приводили к заключению, что только часть массы электрона зависит от скорости и, следовательно, — электромагнитного происхождения; но в последнее время, более точные измерения m и u (стр. 255) в катодных потоках различной скорости, в β -лучах различных категорий заставляют признать, что вся масса электрона — электромагнитная.

Когда электрон теряет свою массу, а вместе с тем и кинетическую энергию, он излучает ее в виде электромагнитных импульсов в окружающее пространство, в виде света или X -лучей (§ 9 и 7). Таким образом, в этом представлении об инерции и кинетической энергии *вне* тела не заключается противоречия с законом сохранения энергии.

Здесь нет также и опровержения принципа сохранения материи: временную массу движущегося электрона можно с полным правом назвать материей; но и тот свет, который излучается электроном при уменьшении его массы, можно считать тоже веществом, обладающим массой. При остановке электрона масса сохраняется; она лишь принимает другой вид, переносится с электрона в лучи света.

18. Добавление об индукции токов. Воспользовавшись представлением о токе, как *переносе* электронов, мы можем показать, что магнетиндукция есть особый случай действия электромагнитной силы. Индуцированная эдс выводится из выражения для этой последней без помощи закона сохранения энергии.

Представим себе проводник, движимый со скоростью v поперек магнитного поля H . Если он наполнен электронами, то и они движутся вместе с ним; это представляет собою ток по направлению v . Чтобы получить целый вещественный луч по этому направлению, мы можем вообразить кроме этого проводника ряд других, проводников $I_1, I_2, \dots$, движущихся друг за другом; в дальнейшем рассуждении эти воображаемые проводники отпадают. Если в каждом элементарном сечении проводника имеется количество электричества q , то величина тока, происходящего от переноса этого заряда, $i = qv$. Таких элементарных токов, параллельных между собою, будет бесконечное множество. На каждую единицу длины такого тока, являющегося перпендикулярным магнитному полю, действует сила $Hi = Hqv$. Следовательно, на каждую единицу электричества действует сила Hv . Это есть „сила на ед. электричества“, направленная

в случае рис. 155 вниз; если электричество в проводнике свободно (электроны диссоциированы), то, может-быть, эта сила не передается веществу его; но с полным правом мы можем рассматривать ее, как некое электрическое поле, напряжением X , положив

$$X = v H. \quad (35)$$

Если обозначить $v = \frac{s}{t}$, то правая часть, помноженная на ед. длины, выражает

$$\frac{l \cdot s \cdot H}{t} = \frac{\Phi}{t},$$

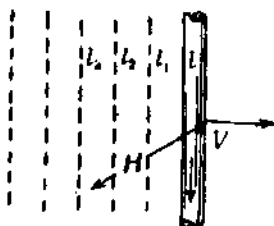


Рис. 155.

т.-е. поток, перерезываемый каждой единицею длины проводника l при его движении по пути s , деленный на время этого перерезывания. С другой стороны, X , если его рассматривать помноженным на единицу длины, представляет собою работу единицы электричества в введенном нами электрическом поле на единице длины проводника, т.-е. эдс на этой длине.

Итак, мы получаем, что при движении проводника поперек магнитного поля в проводнике появляется эдс равная скорости перерезывания силовых линий магнитного потока.

Уравнение (35) можно читать и так: магнитное поле H , движущееся со скоростью v , производит электрическое поле с напряжением Hv , а, следовательно, образует такую же эдс в каждой единице, неподвижного проводника перпендикулярного направлениям H и v (ср. стр. 196 положение II).

В предыдущем выведены оба случая магнетоиндукции, и при этом без предварительного предположения о токе от батареи, которое играет большую роль при выводе на стр. 117—119. Вывод относится непосредственно к разомкнутой цепи, без тока; если ввести индуктированный ток, то мы получим, что его энергия появляется за счет энергии, затрачиваемой на движение проводника.

Уравнение (35) допускает и такое толкование, при котором $Hv = \frac{\Phi}{t}$ рассматривается, как скорость изменения магнитного потока; тогда оно выражает собою вольтаиндукцию. Но здесь введение индуктированного тока приводит к заключению, что его энергия появляется за счет убыли энергии магнитного поля.

19. Электрон в технике. *Катодное реле.* Представление об электронной теории с ее электронами осталось бы у читателя не-

полным, если бы мы не упомянули, что теперь и в технических приборах также видят электроны, как и в научных теориях; техник уже направляет в желаемом смысле их поведение, как и теоретик в уме своем подыскивает наиболее подходящую форму поведения электронов, объясняя электрический ток (стр. 281) или излучение света. Теоретик, наконец, находит с помощью электронов удовлетворительное объяснение старинных загадок, а техник с помощью их же получает разрешение новых вопросов технической обстановки нашей жизни.

В отношении технического применения наиболее посчастливилось электронам, вылетающим из раскаленного тела. Для получения возможности длительного и высокого раскаления берут тонкую вольфрамовую проволоку *H* (рис. 156), раскаляемую до температуры

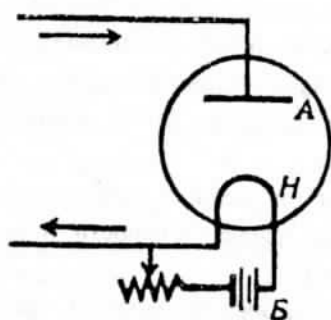


Рис. 156.

свыше 2000°C . обыкновенно электрическим током батареи *Б*. Для свободного прохождения вылетающих электронов нить заключают в стеклянный колпачек (изображенный на рис. 156—158 в виде круга), из которого наилучшим образом высасывают воздух. Электроны принимаются пластинкой *A*.

Получается прибор, катодная лампочка (Флеминг 1904 г.), который пропускает через себя поток электро-

нов только в одном направлении от *H* к *A*, так как пластина *A*, как холодное тело, не выпускает электронов в сколько-нибудь значительном количестве. Этот прибор может служить выпрямителем переменного тока, пропуская только те половинки каждого периода, которые направлены, если обозначать по старинной условности, от *A* к *H*.

Катодный осциллограф. Тот же катодный прибор с двумя электродами имеет еще другое, весьма важное применение; он служит для исследования быстропеременных явлений, например, колебательного электрического тока большой частоты. Для этого стоит лишь подействовать на катодный поток катодной трубки (рис. 159) магнитным полем от катушки *M*, через которую пропускается изучаемый ток. Катушка ставится вне пустотной трубки и направляется осью своею перпендикулярно катодному потоку. Магнитное поле ее, меняющееся вместе с изучаемым током, всё время более или менее отклоняет катодный поток, который поэтому своим концом чертит кривую изме-

лений исследуемого тока. Эту кривую наблюдают или фотографируют, следя за ярким пятном, которое оставляет конец катодного потока на флуоресцирующем экране; экран помещается внутри трубки на месте A (рис. 157).

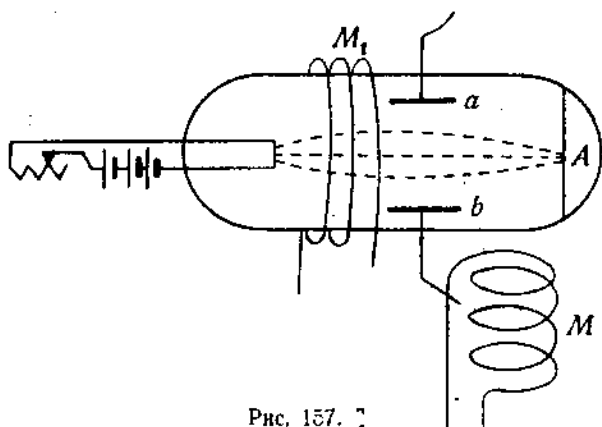


Рис. 157.

Можно воспользоваться и вторым способом воздействия на катодный поток (стр. 259) — электрическими силовыми линиями. Для этого обкладки a и b конденсатора трубки соединяются с теми двумя точками, между которыми действует быстропеременная эдс, например, с обкладками конденсатора колебательного контура.

В обоих случаях для ясности и тонкости получаемого чертежа следует заострить конец катодного потока, как заостряется кисть чертежника. С этой целью катодный поток окружается катушкой M (ось ее совпадает с осью потока), по которой пропускается ток известной силы. Поле такой катушки, проходящее вдоль потока, сводит его в узкий пучок (электромагнитная линза).

Такой прибор, дальнейшие подробности устройства которого мы опускаем, называется катодным осциллографом. В нем пользуются тою моментальностью, с которою электроны катодного потока повинуются мгновенным действиям магнитного или электрического поля.

Особым применением такого осциллографа является изучение процесса взрыва; это применение основывается на замечательном свойстве кварца; кварцевая пластинка, будучи подвержена сжатию или растяжению, электризуется пропорционально деформирующим силам в направлении перпендикулярном к ним. Если электризующиеся плоскости ее соединить с конденсатором ab осциллографа (рис. 157),

а пластинку поместить в бомбу, в которой производится изучаемый взрыв, то все мгновенные изменения давления в бомбе опишутся концом катодного потока.

Триод. Та же катодная трубка, с небольшим лишь изменением в своем устройстве, может служить еще и совершенно иной цели; при этом не пользуются возможностью мгновенного изменения направления катодного потока, но возможностью такого же мгновенного изменения его густоты. В этом случае катодная трубка служит усилителем, что сделало ее применение чрезвычайно распространенным. Для этого в колпачек ее впаявается еще один электрод *C* (рис. 158),

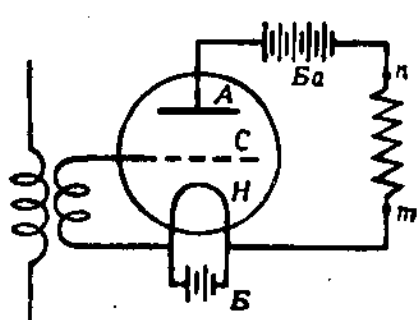


Рис. 158.

обыкновенно называемый сеткой, близкий к нити. Этот третий электрод (Ли де Форест 1908 г.) служит регулятором потока электронов с нити: при отрицательном заряде относительно нити сетка задерживает выход электронов; при потенциале на несколько вольт ниже потенциала нити она уже совсем не позволяет выйти ни одному

электрону; лампа становится непроводящей. Наоборот, при положительном своем заряде сетка облегчает выход электронов, не позволяя им скопиться у нити, и тем мешать друг другу; лампа делается особенно проводящей, малого сопротивления. Тогда ток от мощной батареи *B_a* сильно увеличивается, а приемный аппарат *nm* получает много энергии. Мы видим, что здесь лампочка играет роль реле или когерера на рис. 120 и 124, так как, получая некоторое слабое воздействие, она пускает в ход мощный генератор. Батарея *B* в отличие от *B_a* называется батареей накала.

Сетка связывается с антенной, как показано на рис. 158; принимая колебания, она заряжается периодически, то положительно, то отрицательно, и, следовательно, в цепи *AB_anmHA* периодически увеличивается и уменьшается ток; приемник *nm* эти колебания, совершаемые в такт с колебаниями антенны, усиленные батареей *B_a*, воспринимает на себя. Если назвать эдс батареи *B_a* через *E* и внутреннее сопротивление лампы от *H* до *A* через *X*, то легко видеть, что разность потенциалов и сопротивления *r* между точками *m* и *n* равна

$$E_{mn} = \frac{E \cdot r}{X + r};$$

отсюда видно, что $E_{мп}$ имеет наибольшее значение при $r = X$; как показывает формула, $E_{мп}$ увеличивается с уменьшением X (и притом тем больше, чем ближе к равенству ¹⁾ сопротивления X и r) и также уменьшается с возрастанием X ; она становится колебательной эдс, когда лампочка принимает колебания с антенны, и X то возрастает, то уменьшается; ее колебания пропорциональны E . Этою колебательною разностью потенциалов, которая, конечно, уже больше колебаний напряжения в антенне, можно воспользоваться далее, присоединив точки m и n соответственно к нити и сетки второй лампы, которая вновь усилит колебания помощью своей батареи B_a ; точки m и n второй лампы можно присоединить к нити и сетке третьей и т. д.; нередко пользуются такими трех, шести, девятикратными ламповыми усилителями, принимая с помощью их чрезвычайно слабые колебания в десятки тысяч раз менее мощные, чем те, которые непосредственно можно было бы принять на телефон. Таким путем эти маленькие лампочки позволяют весьма удлинить дальность радиопередачи.

Катодное реле может быть одновременно и усилителем, и детектором; для этого следует лишь держать сетку при таком (низком) потенциале относительно нити, чтобы изменение его в сторону понижения не производило уже никакого или очень малое действие на катодный поток, тогда как изменение его в сторону увеличения будет производить хорошее увеличение тока от батареи B_a ; тогда одна (отрицательная) половинка каждого колебания не будет действовать, будет как бы не проходить, и колебание окажется усиленным и детектированным одновременно.

Наконец, катодная лампочка может быть и генератором незатухающих колебаний (Мейснер 1913 г.); это основывается на так называемом „принципе возвратного действия“. В цепи B_a включается колебательный контур LC (рис. 159). При каждом замыкании батареи B в нем начнутся колебания вследствие присутствия конденсатора и самоиндукции; они должны были бы быстро затухнуть; но, как показывает рисунок, они отражаются на сетке через катушки со взаимной индукцией M ; а выше было объяснено, что колебания потенциала сетки вызывают периодические приливы энергии батареи B_a между точками m и n , т. е. как раз к нашему колебательному контуру; это обстоятельство не позволяет замереть его колебаниям; они являются незатухающими.

¹⁾ Ток в том же контуре, конечно, тоже увеличивается, но тем больше, чем меньшее сопротивление приемника.

Небольшие катодные лампочки могут производить незатухающие, колебания только малой мощности; но это именно и требуется от

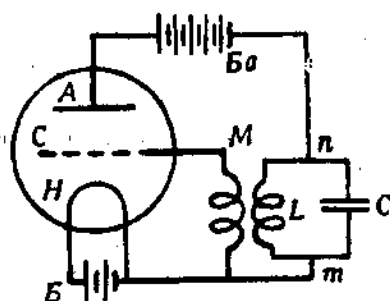


Рис. 159.

того „второго“ генератора незатухающих колебаний, который необходим при приеме незатухающих колебаний с антенны (стр. 246). В настоящее время строятся большие катодные лампы, генерирующие колебания столь большой мощности, что после одного-двух усилений в антенну передаются от них незатухающие колебания достаточные для радиотелефониро-

вания на тысячи километров (Бонч-Бруевич).

Искра и вольтова дуга. Искра, которая, как мы видели, прежде играла такую большую роль в беспроволочном телеграфе (он и назывался прежде „искровым“, а техники, занимавшиеся им, — „искровиками“), представляет собою, конечно, электронный процесс.

Многие подробности явления искры ждут еще своего объяснителя, но несомненно, что она начинается электронами, случайно имеющимися в газе или пр изведенными, например, ультрафиолетовым светом (стр. 258); при достаточном напряжении электрического поля в искровом промежутке эти электроны получают достаточную кинетическую энергию для разбивания встречающихся молекул, ионизируют газ, делают его проводящим. Недлинная искра от индукционной катушки между тонкими платиновыми проволоками (только не колебательная) имеет очень интересную особенность: ее катод до-бела раскаляется, как было упомянуто на стр. 226; это положительные ионы своею бомбардировкою приводят его в такое состояние.

Дальнейшее развитие процесса заключается в возрастающем обилии электронов и ионов; их бомбардировка становится столь „ураганной“, что оба электрода раскаляются, хотя бы они и не были тонкими платиновыми кончиками, а большими угольными стержнями. Читатель догадывается, что мы говорим уже о вольтовой дуге (стр. 55); высокое раскаление электродов причиняет богатое освобождение электронов с их поверхности; и, таким образом, процесс становится устойчивым, снабжающим сам себя своими главными деятелями. Отсюда видно что вольтова дуга в большой мере зависит от того же явления, на котором основывается действие катодной лампочки (теория Миткевича).

Понимая механизм этих явлений, техника выработала ряд правил на те случаи, (напр., см. стр. 238), когда нежелательна устойчивая вольтова дуга, нежелателен переход искры в дугу: охлаждение электродов (напр., проточной водой), большая теплопроводность и теплоемкость их, газ трудно ионизируемый с большой теплопроводностью (водород), легко воссоединяющий ионы с электронами в нормальную молекулу; продувание искрового промежутка, удаляющее ионы; наконец, действие магнитным полем. Дуга отклоняется магнитным полем (не так, как катодный поток, но как $(+)$ ионный поток) и при достаточной его силе срывается с полюсов и гаснет.



ГЛАВА XIV.

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.

1. Три системы измерений. Во многих местах этого курса проводится известная система при измерении различных величин; и только с помощью этого законы явлений, в которые входят величины различного характера, дают возможность получить определенные численные значения.

Построить систему измерений не представлялось трудною задачею; мы выбирали возможно малое число, обыкновенно — три, основных единиц и на этом фундаменте строили всю систему, выводя все остальные единицы для измерений из основных; для этого вывода пользуются какими угодно формулами, обыкновенно — простейшими, связующими основные и производные единицы. Стройность, внутренняя единообразность нашего знания служат ручательством того, что в каком бы порядке мы не делали этот вывод, какие бы формулы для него ни избрали — производные единицы получатся всегда одинаковыми.

В нашем курсе мы пользовались тремя системами: практическая, CGS-ная электромагнитная и CGS-ная электростатическая.

2. Практическая и CGS электромагнитная системы. Различие первых двух заключается просто в различном выборе основных единиц. Основанием практической системы могут служить:

джоуль, секунда, квадрант;

квадрант равный приibl. четверти земного меридиана, определяется, как 10 000 километров = 10^9 см.

Основанием CGS-ной системы можно считать

эрг. = 10^{-7} дж., секунда, сантиметр = 10^{-9} квад.

Отсюда все различие между этими системами. Так, например, единичная скорость в практической системе

$$\frac{\text{квадр.}}{\text{сек}} = \frac{1}{30} \text{ скорости света,}$$

а единица скорости CGS-ной системы в тысячу миллионов раз меньше:

$$\frac{\text{см}}{\text{сек}} = \frac{1}{3 \cdot 10^{10}} \text{ скорости света.}$$

Теперь воспользуемся тем известным соотношением, что работа (энергия) = сила $\times$ путь, или, иными словами, что сила = $\frac{\text{работа}}{\text{длина}}$; отсюда получаем, что единица силы в CGS-ной системе (дина) представляется такою силою, которая на пути в 1 см совершает эрг;

$$\text{дина} = \frac{\text{эрг}}{\text{см}}.$$

Единичная сила практ. системы совершает свой джоуль на таком громадном пути, что оказывается в 100 раз меньше дины;

$$\text{эта сила} = \frac{\text{джоуль}}{\text{квадр.}} = \frac{10^7 \text{ эрг}}{10^9 \text{ см}} = 10^{-2} \frac{\text{эрг}}{\text{см}} = 0,01 \text{ дины.}$$

Точно также и для электрических и магнитных величин две рассматриваемые системы дают различные единицы. Так, например, закон Куло'на для магнетизма

$$m = r \sqrt{F}$$

даст в практ. системе единицу для m в 10^8 раз большую, чем в CGS-ной системе, в чем легко убедиться, измерив квадрант в см и практ. ед. силы в динах.

Наконец, один ампер, обтекая по кругу с радиусом в 1 квадрат. (останемся на том же определении ед. тока, которым мы пользовались для CGS-ной системы на стр. 100), действует на 10^8 CGS-ных ед. магнетизма с силою в 1π сотых дины; отсюда следует, что ампер = 10^{-1} CGS-ной ед. тока [форм. (19)].

Мы видим, что соотношение между этими двумя единицами тока как и всякими двумя единицами в CGS-ной электромагнитной и практической системах, не должно рассматриваться, как опытное данное; оно с полною точностью определяется теоретически из соотношения между основными единицами; оно оказывается круглым числом 10^9 , потому что соотношения между основными единицами взяты в виде десяти в целой степени. По мере увеличения точности измерений под теоретические соотношения, разумеется, подтверждаются все точнее.

Выражения для кулона, вольта и ома в CGS-ной системе даны на стр. 100.

Единицею емкости в практической системе является такая емкость, называемая фарадою, которая, будучи заряжена одним куло-

ном, обнаруживает разность потенциалов в 1 вольт, по формуле

$$C = \frac{Q}{E} \text{ (стг. 177).}$$

В CGS-ной системе единичная емкость при заряде в 10 кул. получает разность потенциалов всего в 10^{-8} вольта; эта единичная емкость $= 10^9$ фарады

3. Электростатическая и электромагнитная системы. Переходим к сравнению электростатической и электромагнитной систем. Здесь мы встречаемся с трудностью особого рода, которая выступит наиболее ясно, если мы обе сравниваемые системы возьмем на одинаковых основаниях, обе CGS-ные. В обеих одинаковые единицы длины и времени — *см* и *сек*, одинаковые единицы энергии и силы — эрг и дина; но все единицы электрические и магнитные в них оказываются различными.

Если, например, измерить количество электричества в неподвижном состоянии, по закону Кулона, т.-е. статически, в *см* и динах, а затем тот же самый заряд измерить опять в *см* динах и *сек*, но в тот момент, когда он протекает, например, в землю, и образует, как ток, магнитное поле, то при этих двух измерениях мы получим два разные результата: заряд, измеренный статически, окажется в $3 \cdot 10^{10}$ больше того же заряда, измеренного в то время, когда он протекает, измеренного по законам электромагнетизма.

Число $3 \cdot 10^{10}$ в системе CGS равно скорости света в пустоте; для одного и того же заряда в CGS системе, измеренного статически и электромагн., получаем два различных числа, находящихся в отношении равно скорости света.

Этот опытный результат можно формулировать следующим образом: в статической системе единица для количества электричества в "скорость света раз" меньше электромагнитной.

Энергия — понятие универсальное; в какой бы системе мы не измеряли EQ , мы всегда должны получить одно и то же число эргов; следовательно, единица разности потенциалов в статической системе в скорость света раз больше, чем в системе магнитной.

Таким же образом и все электрические и магнитные величины получают по две различных единицы; одну в статической системе, а другую в электромагнитной.

Относительно этих величин знание перестает быть однообразным. Раскол между двумя системами выступает еще определеннее, если обратиться к смыслу того, что мы разумеем под одною и тою же

величиною, т.-е. какова „размерность“ или „измерение“ одной и той же величины в обеих системах.

4. Размерности. Связь между исследуемого величинсю и основными называется ее размерностью. Размерность количества электричества в статической системе может быть найдена, если мы решим закон Кулона, взятый для электричества, относительно Q ; *этот закон кладется в основание электростатической системы:*

$$\text{Размерность } Q = [Q] = r \sqrt{F} \quad (A)$$

Размерность того же самого количества в электромагнитной системе получается из закона Лапласа, примененного, например, к круговому проводнику с одним витком. Сначала получаем

$$i = \frac{rF}{2\pi m};$$

затем

$$[Q] = it = \frac{rF}{m} \cdot t.$$

В выражении для размерности численные множители, как 2π , не имеют значения и потому опускаются.

Но *во главу электромагнитной системы кладется понятие о количестве магнетизма, рассматриваемом по закону Кулона, отнесенному к магнетизму*; таким образом, это основное понятие получает размерность

$$[m] = r \cdot \sqrt{F}. \quad (B)$$

Откуда электромагнитная размерность количества электричества:

$$[Q] = t \cdot \sqrt{F}. \quad (C)$$

Мы видим, что, судя по размерностям, под понятием „ Q “ в двух разбираемых системах разумеются различные величины. Отношение их размерностей имеет определенный смысл; из отношения (A) к (C) оно оказывается $\frac{\text{длина}}{\text{время}}$, т.-е. скорость.

Таким образом в этих двух системах под одним и тем же словом разумеются различные понятия; но кроме того совершенно разные понятия оказываются имеющими одинаковую размерность, что явствует из выражений (A) и (B).

Та система, которою мы пользовались с самого начала изложения, *практическая система построена по типу электрома-*

гнитной. Поэтому в ней все величины имеют тот же смысл (размерность), как и в CGS электромагнитной, которую мы установили с главы о магнетизме, из закона Кулона о магнитных массах. Так, например, в обеих системах коэффициенты взаимной индукции и самоиндукции имеют размерность длины, как это явствует из формул на стр. 125 и 126; единицею для них и служит в практической системе квадрант (генри), а в CGS-ной ее единица длины, т.-е. сантиметр.

CGS электростатическая система введена в главе об электростатике.

Не трудно продолжить вывод размерностей для остальных электрических величин. Так, например, в электростатической системе размерность E выведем из того соображения, что $E \cdot Q$ представляет собою энергию, размерность которой есть $F \cdot L$ (работа); отсюда получаем:

$$[E] = \frac{\text{сила} \times \text{длина}}{\text{колич. электр.}} = \frac{F \cdot L}{L \cdot \sqrt{F}} = \sqrt{F}.$$

Здесь L имеет смысл „длины“, которая в выражении (A) обозначена через r .

Далее получаем размерность

$$[R] = [E \cdot i] = \frac{\sqrt{F}}{L \cdot \sqrt{F} \cdot T^{-1}} = \frac{T}{L}.$$

Подобным же образом выводятся $[E]$ и $[R]$ в электромагнитной системе.

В виде задачи интересно проверить, что правые части формул (35) и след. на стр. 281 действительно имеют размерности токов; необходимо при этом не забыть, что в этих формулах i обозначает ток через единичное сечение проводника, и что N есть число (не имеющее размерности) на куб. единицу проводника; формулы даны в электростатической системе.

5. Соединение обеих систем в одну. Полная единообразность нашего знания получается, если мы встанем на фарадеевскую точку зрения. Оба закона Кулона, положенные в основу систем, были принимаемы нами без поправок в смысле действия среды. Приняв же это действие во внимание, мы получим (стр. 78 и 174)

$$[Q] = r\sqrt{Fk}; [m] = r\sqrt{F \cdot \mu}.$$

Здесь две разные размерности, как это и должно быть для двух различных понятий.

Когда дело идет о размерности, величины k и μ не могут быть опущены; они сами суть особые размерности, не разрешимые пока в основные понятия длины, времени, силы.

Приняв их во внимание, мы получим для отношения статического и электромагнитного понятия „ Q “ величину:

$$\frac{\text{длина}}{\text{время}} \left[\sqrt{k \cdot \mu} \right].$$

Если наше знание стало единообразным после того, как была принята во внимание среда, т.е. вообще все, что может быть принято во внимание, тогда размерность $\sqrt{k\mu}$ должна быть обратной размерности скорости:

$$\left[\sqrt{k \cdot \mu} \right] = \frac{\text{время}}{\text{длина}}.$$

Если это так, то размерность для Q в обеих рассматриваемых системах оказывается одною и тою же.

6. Скорость света. Величины k и μ , как мы сказали, неразрешимы в основных единицах; с точки зрения измерений это означает, что мы не можем измерить этих двух свойств тел абсолютно; это, впрочем, в равной мере относится и ко всем свойствам тел кроме чисто нумерических, как, например, число атомов в единице объема.

Если бы можно было измерить абсолютно k_0 и μ_0 пустоты (чистый эфир), например, в CGS системе, то при измерении Q в статич. и магнитной CGS системах, мы получили бы тождественные, как это и подобает для пустоты, числа при условии:

$$\sqrt{k_0 \mu_0} = \frac{1}{3 \cdot 10^{10}}, \text{ т.е.}$$

$$\frac{1}{\sqrt{k_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^{10} = \text{скорость света в пустоте.}$$

Таким образом, единообразие понятий была бы подтверждена численно. На опыте же отношение для Q получается равным скорости света в пустоте, так как принимается, что $k_0 = \mu_0 = 1$.

И для всякой другой среды величина $1/\sqrt{k_1 \mu_1}$ должна, следовательно, равняться скорости света в этой среде. Но не имея абсолютных измерений, мы знаем лишь отношение:

$$\sqrt{k_1 \mu_1} = \sqrt{\frac{k_1}{k_0} \cdot \frac{\mu_1}{\mu_0}} = \frac{\text{скорость света в пустоте}}{\text{скорость света в среде}},$$

что представляет собою показатель преломления света. Таким образом доказывается основное положение электромагнитной теории света, что показатель преломления изолирующей среды может быть определен по ее магнитной проницаемости и диэлектрической постоянной (стр. 229); он равен $\sqrt{k\mu}$.

Отношение для Q в этой среде, измеренных электростатическим и электромагнитным способами, будет уже не единица, но

$$\text{скорость света в среде} \times \sqrt{k\mu} = 3 \cdot 10^{10}.$$

Таблица единиц.

	CGS-СИСТЕМА.		ПРАКТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.
Длина	сантиметр = 10^{-9} квадр.		квадрант
Масса	грамм-масса		масса = 10^{-11} гр.
Время	секунда		секунда
Сила	дина		—
Энергия	эрг = 10^{-7} дж.		джоуль
Мощность	эрг в сек. = 10^{-7} ватт		ватт
	Электростат. Электромагн.		Электромагн.
Колич. электр.	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-9}$ кул.	10 кул.	кулон
Велич. тока	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-9}$ амп.	10 амп.	ампер
Разн. потенц.	300 вольт	10^{-8} вольт	вольт
Сопротивление	—	—	ом
Козфф. самоинд.	—	10^{-9} генри	генри
Емкость	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ фар.	10^{-9} фар.	фарада
Напряж. магн. п.	—	гаусс	—
Магн. поток индукции	—	максвелл	—

Примечание. Пропущенные единицы неупотребительны.

УКАЗАТЕЛЬ.

Единицы измерений.

Ампер — 28, 50.
Ватт — 29, 50.
Вольт — 26, 50, 100.
Гаусс — 69, 79.
Генри — 126.
Джоуль — 26, 27, 50.
Дина — 12, 68.
Единица количества магнетизма — 68.
Единица силы — 12, 295.
Килограммометр — 11, 26.
Кулон — 27, 50.
Лошадиная сила — 16, 29.
Малая калория — 12.
Микрофарада — 177.
Ом — 40, 100.
Практическая система единиц — 25, 50, 99, 321.
Система CGS — 68, 99, 166, 173, 321.
Фарада — 177.
Электростатическая CGS единица колич. электричества — 166.
Электростатическая CGS единицы емкости (сантиметр) — 181, 262.
Эрг — 12.

Измерения и измерительные приборы.

Абсолютное измерение тока — 98.
Амперметр — 28, 56, 112.
Астазирование — 109.
Баллистический отсчет — 185.
Ваттметр — 111.
Вольтметр — 27, 155.

Вольтметр — 30, 56, 112.
Включение амперметра — 57.
Включение вольтметра — 111.
Включение вольтметра — 57.
Градуировка амперметра — 28, 56.
Градуировка ваттметра — 111.
Градуировка вольтметра — 57.
Градуировка чувствительного гальванометра — 46.
Измерение полной эдс вольтметром — 58.
Измерение токов большой частоты — 248.
Квадрантный электрометр — 181.
Магазин сопротивлений — 41.
Мост Витстона — 48.
Нормальный элемент — 161.
Осциллограф — 288.
Потенциометрический метод — 46.
Приборы с магнитными стрелками — 109.
Приборы с подвижной катушкой — 109.
Реостат — 41.
Сравнение эдс элементов — 47.
Струнный гальванометр — 111.
Тангенсгальванометр — 96.
Шунт — 44, 50, 112.
Электродинамометр — 110.
Электроскоп — 168, 180.

Магнетизм.

Взаимодействие на расстоянии — 67, 87, 88.
Гистерезис — 147, 206.
Диамагнитные тела — 76, 80.

Единица количества магнетизма — 68.
 Задерживающая сила — 66.
 Закон Кулона — 66, 67, 78.
 Земной магнетизм — 82.
 Коэффициент намагничивания — 80.
 Магнетон — 81.
 Магнетизм вращения — 87.
 Магнитная проницаемость — 74.
 Магнитное сопротивление — 75.
 Магнитный спектр — 71.
 Магнитодвижущая сила — 103.
 Насыщение магнитное — 66, 74.
 Остаточный магнетизм — 66, 80, 81.
 Парамагнитные тела — 76, 80.
 Полный поток — 80, 103.
 Поток магнитной индукции — 79.
 Поток магнитный — 73, 79.
 Свойства магнитного потока — 72.
 Силовой поток — 79.
 Теория Ампера — 192.
 Теория близкогодействия — 72, 75, 85, 107.
 Ферромагнитные тела — 74, 80.

Напряжение.

Градиент — 18.
 Градиент электростатического поля — 176.
 Индуцированная эдс — 119, 133, 196, 286.
 Напряжение магнитного поля — 68, 71, 72, 77, 79.
 Напряжение энергии — 17.
 Напряжение электростатического поля — 175.
 Падение потенциала в цепи — 29.
 Разность потенциалов — 174.
 Эдс — 26, 50.

Приложения электричества.

Выпрямитель — 288.
 Громкоговоритель — 122.
 Динамомашина — 137.
 Индукционная катушка — 123, 130, 183, 267.
 Лампа накаливания — 21, 53.
 Лампа ртутная — 56.

Микрофон — 53, 121, 246.
 Осциллограф — 288.
 Передача энергии переменным током — 200.
 Приложения электролиза — 155.
 Радиотелеграф — 236.
 Радиотелефон — 246.
 Схема Эдисона — 59.
 Телефон — 240.
 Триод — 290.
 Фотоэлемент — 270.
 Электрическая грелка — 52.
 Электрическая спайка — 55.
 Электродвигатель — 147.
 Электрификация — 238.

Сопротивление.

Безваттное сопротивление — 208.
 Внешнее сопротивление — 37.
 Внутреннее сопротивление — 37.
 Емкостное сопротивление — 206.
 Магнитное сопротивление — 75.
 Полное сопротивление — 208.
 Приведенное сопротивление — 45.
 Суперапроводимость — 129.
 Температурный коэффициент сопротивления — 39.
 Удельная проводимость — 38, 281.
 Электролиз — 154.

Теория электричества.

Действие на расстоянии — 166.
 Диэлектрик — 171.
 Дуалистическая теория — 165, 168, 170.
 Закон Кулона — 166, 174.
 Контактная разность потенциалов — 157, 191, 269, 284.
 Поток электрической индукции — 175.
 Принцип сохранения электричества — 21, 167, 283.
 Теория Фарадея — 171, 228.
 Унитарная теория — 170, 262.
 Электрон — 254.
 Электронная теория — 250.
 Электричество и материя — 276.

Ток электрический.

- Катодный поток — 252.
- Мощность тока — 29.
- Направление тока — 24.
- Правило Ампера — 89.
- Паразитные токи — 130.
- Сеть электрическая — 58.
- Сила тока — 28.
- Теория Фарадея — 195.
- Ток ионизации — 259, 292.
- Ток колебательный — 224.
- Ток конвекции — 285, 288.
- Ток переменный — 203.
- Ток постоянный — 23, 194, 206.

Токи смещения — 230, 237.

Ток электрический — 22.

Энергия тока — 25, 28.

Энергия.

- Второе начало, 13, 14, 17, 78.
- Кпд генератора — 30, 37, 43, 16, 146.
- Потенциальное действие — 15.
- Преобразование энергии — 9, 21.
- Принцип сохранения энергии — 9.
- Работа — 10.
- Работа в цепи — 25, 29.
- Распределение электрической энергии — 42, 60, 208.
- Энергия конденсатора — 178.
- Электрическая энергия — 18.



000000581087

1926

- 409397

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО РСФСР
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

Ф. И. Холуяков

проф. Ленинградского Электротехнического Института им. В. И. Ульянова (Ленина)

**АЛЬТЕРНАТОРЫ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Краткое руководство к теоретич. и практическ. изучению их работы.
ТРЕТЬЕ ИЗДАНИЕ.

Стр. 180.

Ц. 2 р.

**АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ
ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКА**

Краткое руководство к теоретич. и практическ. изучению их работы.
С 74 фигурами в тексте.

Стр. 164.

Ц. 2 р.

**ТРАНСФОРМАТОРЫ
ОДНОФАЗНОГО И ТРЕХФАЗНОГО ТОКА**

Краткое руководство к теоретич. и практическ. изучению их работы.
Стр. 136. С 110 рисунками в тексте. Ц. 1 р. 75 к.

**СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ
ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

В переводе и обработке профессора Ф. И. Холуянова
С 5 фигурами.

Допущено Научно-Технической Секцией Госуд. Ученого Совета

Стр. 194.

Ц. 1 р. 50 к.

К. И. Шенфер

Профессор Московского Высшего Технического Училища

**ДИНАМО-МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА
Часть I. ТЕОРИЯ.**

(Обмотки, коммутация и характеристики.)

Стр. 189.

С 159 фигурами в тексте.

Ц. 2 р.

Проф. И. Г. Фрейман

КУРС РАДИОТЕХНИКИ

Стр. 342.

С 254 чертежами в тексте.

Ц. 6 р.

А. А. Смуров

профессор Электротехнического Института имени В. И. Ульянова (Ленина).

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ
И ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

Стр. VIII, 443.

С 379 фигурами.

Ц. 5 р. 75 к.