

В. Ф. МИТКЕВИЧ

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

В. Ф. МИТКЕВИЧ — ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Акад. В. Ф. МИТКЕВИЧ

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

КАК ОНА ДОБЫВАЕТСЯ,
КАК ОНА ПЕРЕДАЕТСЯ,
КАК ОНА ПОТРЕБЛЯЕТСЯ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ, ПЕРЕСМОТРЕННОЕ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1946 ЛЕНИНГРАД

В книге в доступной форме изложены основные законы электротехники, а также способы производства, передачи и потребления электрической энергии.

Книга предназначена для лиц, которые не обладают специальными знаниями в области электротехники, но в то же время желают понять, что представляет собой электрическая энергия.

Редактор Л. Н. Баптиданов

Технический редактор А. Д. Чаров

Сдано в пр-во 8/V 1946 г. Подписано к печати 9/IX 1946 г. Объем $19\frac{1}{2}$ п. л.
21 уч.-авт. л. Тираж 10 000 Формат бумаги $60 \times 92\frac{1}{16}$. Цена 17 руб.
А-05874 42 920 тип. знак. в 1 печ. л. Заказ № 1146

Типография Госэнергоиздата МЭС. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Книга эта должна была выйти в свет летом 1941 г. Она была уже набрана и сверстана к моменту вероломного нападения Германии на нашу Родину. В связи с обстоятельствами военного времени вся наша страна переключилась на работу оборонного характера. Но наступил «и на нашей улице праздник».

9 мая 1945 г. И. В. Сталин в своем незабываемом обращении к народу сказал:

«Теперь мы можем с полным основанием заявить, что наступил исторический день окончательного разгрома Германии, день великой победы нашего народа над германским империализмом».

.
«Товарищи. Великая Отечественная война завершилась нашей полной победой. Период войны в Европе кончился. Начался период мирного развития».

Итак, наша страна, с честью вышедшая из тягчайших испытаний, выпавших на ее долю, возвращается к продолжению прерванной работы в различных областях мирного строительства. Между прочим, это относится также к возобновлению усиленной деятельности наших книгоиздательств. Осуществляется таким образом и выпуск второго издания моей научно-популярной книги «Электрическая энергия». Она предназначена для широкого круга тех читателей, которые интересуются вопросами электроэнергетики, приобретающей в настоящее послевоенное время особо важное значение.

20 мая 1945 г.

В. МИТКЕВИЧ

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Громадные успехи индустриализации нашей страны тесно связаны с планомерным использованием природных запасов энергии, которыми мы обладаем. Легко передаваемая на большие расстояния электрическая энергия обычно является наиболее подходящим промежуточным звеном в длинной цепи преобразований энергии от места нахождения ее природных запасов до места ее потребления. Ясно, следовательно, какое существенное значение приобретают все работы по электрификации СССР. Успешное разрешение задач, относящихся к развитию электроснабжения, несомненно, способствует поднятию на высокий уровень всех отраслей народного хозяйства. Конечно, одновременно с этим разнообразные приложения электрической энергии: в домашнем быту, для обслуживания общественных зданий, для освещения улиц и площадей — способствуют поднятию общего культурного уровня нашей жизни. Особенно важно отметить, что все эти возможности являются результатом ряда ценных свойств электрической энергии.

Природа предоставляет в наше распоряжение неисчерпаемые запасы энергии. Искания человека с незапамятных времен были направлены к тому, чтобы наилучшим образом овладеть этими запасами энергии или, как говорят, подчинить себе силы природы. Уже в глубокой древности применялись водяные (гидравлические) и ветровые двигатели, которые позволяли, однако, производить разного рода механическую работу лишь там, где по естественным условиям можно было установить эти двигатели. Только во второй половине XVIII века, с изобретением паровой машины, вызвавшей в свое время большой переворот в технике и в формах производственных отношений, человечество впервые получило возможность сравнительно легко приближать механические

двигатели к месту потребления энергии, подвозя туда топливо. Изобретение это имеет большое значение еще в одном отношении: паровая машина в случае необходимости может перемещаться вместе со своим запасом топлива. Самым ярким примером использования этого важного свойства паровой машины является современный сухопутный и водный транспорт (паровозы и пароходы). Дальнейшее развитие тепловых машин привело к изобретению двигателей внутреннего сгорания, в которых топливо сжигается не в топке парового котла, а непосредственно в цилиндрах. Различные применения двигателей внутреннего сгорания в авиации, в автомобиллизме и т. д. были результатом именно того, что они значительно легче старой паровой машины и вследствие этого более пригодны для передвижения.

Современные тепловые (паровые и внутреннего сгорания), гидравлические и ветровые двигатели достигли высокой степени совершенства. Главным недостатком их, однако, остается то обстоятельство, что в случае необходимости распределять энергию между многими местами ее потребления трудно достигнуть достаточной экономичности и обычно приходится прибегать к более или менее сложным механическим приспособлениям. Увеличение числа мест потребления энергии, получаемой от первичных тепловых и других двигателей, а также увеличение расстояний между ними создавали во многих случаях непреодолимые затруднения.

Господство человека над силами природы, т. е. использование природных запасов энергии, стало значительно совершеннее после того, как около 1800 г. было открыто и в течение ряда последующих десятилетий всесторонне изучено явление электрического тока. Благодаря этому в конце концов появилась возможность экономично передавать на очень большие расстояния новый вид энергии, именно электрическую энергию. Как всем хорошо известно, она легко может быть подведена по неподвижным металлическим проводам к сколь угодно большому числу мест потребления энергии, что представляет собой весьма существенное обстоятельство, благоприятствовавшее развитию применений электрической энергии. Этому же содействовала и ее способность превращаться в механическую работу, в тепло и т. д. Удачное разрешение

ряда вопросов, связанных с построением различных приемников электрической энергии, в значительной мере объясняется именно тем, что она легко и просто претерпевает разного рода преобразования. К этому надо добавить большое совершенство современных мощных электрических генераторов¹, при посредстве которых механическая работа первичных двигателей (тепловых и гидравлических) превращается в электрическую энергию. Основным моментом в развитии применения этого рода энергии все же является ее большая, так сказать, подвижность. Поэтому в современных условиях передача и распределение энергии обычно полностью осуществляются при посредстве электрического тока, а тепловые и гидравлические первичные двигатели служат только в качестве необходимых основных устройств в общем ходе преобразований природных запасов энергии в электрическую энергию. Итак, развитие электротехники в известном смысле увенчало долгие усилия человечества, направленные к использованию этих природных запасов энергии и к подаче их в наиболее удобной форме в места потребления, как угодно расположенные. Совершенно очевидно таким образом, что применение электрической энергии произвело полную революцию в промышленности и вообще в материальной обстановке, в которой мы существуем.

Исключительно важное значение того обстоятельства, что электрическая энергия может легко передаваться на большие расстояния и удобно распределяться по местам потребления, в свое время было отмечено Марксом и Энгельсом. В связи с замечательными опытами Марселя Депре Карл Маркс писал Фридриху Энгельсу (8 ноября 1882 г.):

«Дорогой Фред. Что скажешь ты об опыте Депре на Мюнхенской электрической выставке? Уже около года Лонге обещал мне достать работы Депре (специально для доказательства, что электричество допускает передачу силы на большие расстояния при посредстве простой телеграфной проволоки). Близкий к Депре человек, д-р д'Арсонваль, состоит сотрудником «Justice» и напечатал несколько статей об исследованиях Депре...»².

¹ Латинское слово «генератор» значит «источник», «производитель».

² Маркс и Энгельс, Сочинения, т. XXIV, стр. 584, М., 1931 г.

11 ноября 1882 г. Энгельс отвечает Марксу:

«Меня очень интересуют подробности о произведенных в Мюнхене опытах Дебре... Открытие делает возможным использование всей колоссальной массы водяной силы, пропадавшей до сих пор даром»¹.

В 1883 г. Энгельс писал Бернштейну:

«Новейшее открытие Дебре, состоящее в том, что электрический ток очень высокого напряжения при сравнительно малой потере энергии можно передавать по простому телеграфному проводу на такие расстояния, о каких до сих пор и мечтать не смели, и использовать в конечном пункте, — дело это еще только в зародыше, — это открытие окончательно освобождает промышленность почти от всяких границ, налагаемых местными условиями, делает возможным использование также и самой отдаленной водяной энергии, и если вначале оно будет полезно только для *городов*, то в конце концов оно станет самым мощным рычагом для устранения противоположности между городом и деревней. Совершенно ясно, что благодаря этому производительные силы настолько вырастут, что управление ими будет все более и более не под силу буржуазии»².

Когда после Великой Октябрьской социалистической революции встал вопрос об индустриализации нашей страны, бывшей раньше весьма отсталой в техническом отношении, В. И. Ленин устремил свое внимание на такой прогрессивный фактор, как широкое использование наших природных запасов энергии путем сооружения крупных центральных электрических станций, которые питали бы соответственным образом развитую сеть линий передачи электрической энергии. Во исполнение указаний Владимира Ильича в 1920 г. была создана Государственная комиссия электрификации России (Гоэлпро), которая под руководством Г. М. Кржижановского разработала научно обоснованный общий план снабжения нашей страны электрической энергией. Этот план является ценнейшим и первым в мире образцом того, как надо организовывать энергетическое хозяйство страны. Много из намеченного Государственной комиссией электрифи-

¹ Там же, стр. 587.

² Маркс и Энгельс, Сочинения, т. XXVII, стр. 289, М., 1935 г.

кации России выполнено за истекшее время героической стройки: сооружены крупные гидроэлектрические станции на Волхове, Свири, Днепре и т. д., ряд тепловых электрических станций значительной мощности (Шатурская, Каширская, Зуевская и т. д.), и наша страна покрылась сетью электропередач высокого напряжения. Многое необходимо еще выполнить в ближайшие пятилетки. План грандиозен и превосходит всё, что когда-либо и где-либо предпринималось. С течением времени этот план, конечно, развивается по мере того как намечаются новые промышленные районы и выявляются новые запасы минерального топлива и гидравлической энергии. В переживаемую нами сталинскую эпоху дело, начатое В. И. Лениным, продолжается. Наша страна под руководством Всесоюзной коммунистической партии (большевиков), возглавляемой великим Сталиным, успешно завершит намеченный план электрификации СССР.

Эта книга предназначена для читателей, которые не обладают специальными знаниями в области электротехники, но в то же время стремятся понять, что представляет собой электрическая энергия, как она добывается, как она передается и распределяется и как она потребляется. Первые четыре главы по существу являются введением и служат для предварительного ознакомления с некоторыми основными физическими явлениями. Для чтения данной книги не требуется особых сведений по математике и физике. Она доступна, следовательно, самому широкому кругу читателей.

4 марта 1938 г.

В. МИТКЕВИЧ

СОДЕРЖАНИЕ

(Цифры, следующие за наименованиями параграфов, указывают соответствующие страницы)

Предисловие ко второму изданию	3
Предисловие к первому изданию	4
Глава первая. Работа и энергия	11—26
1. Механическая работа (11); 2. Энергия (13); 3. Закон сохранения энергии (14); 4. Энергия движения или кинетическая энергия (15); 5. Тепловая энергия (16); 6. Химическая энергия (18); 7. Энергия положения, потенциальная энергия (19); 8. Лучистая энергия (21); 9. Эфир—носитель и передатчик лучистой энергии (23); 10. Электромагнитная энергия (24); 11. Энергия, излучаемая радиостанциями (24); 12. Движение электромагнитной энергии вдоль проволоки (26).	
Глава вторая. Основные электрические явления	27—60
13. Происхождение слова «электричество» (27); 14. Простейшие электрические приборы и опыты с ними (27); 15. Два рода электричества (30); 16. Изоляторы и проводники (32); 17. Закон Кулона (34); 18. Электрический потенциал. Разность потенциалов, напряжение (35); 19. Единица потенциала и разности потенциалов. Вольт (39); 20. Электростатический вольтметр (40); 21. Электризация через влияние (41); 22. Электрофор (45); 23. Электрический конденсатор (48); 24. Электрическое поле. Энергия электрического поля (48); 25. Строение вещества. Электрон (57).	
Глава третья. Основные магнитные явления	60—81
26. Происхождение слова «магнетизм» (60); 27. Магнитные полюсы. Два рода магнитных полюсов (61); 28. Закон Кулона для магнитных взаимодействий. Единичный магнитный полюс (62); 29. Намагничивание через влияние (63); 30. Магнитное поле. Магнитные линии (66); 31. Магнитный поток (71); 32. Магнитная индукция (76); 33. Магнитная проницаемость (78); 34. Магнитная сила (78); 35. Энергия магнитного поля (81).	
Глава четвертая. Электрический ток	82—178.
36. Электромагнитная индукция тока (82); 37. Магнитное поле электрического тока. Направление тока (86); 38. Основные способы получения электрического тока (92); 39. Сила тока, электродвижущая сила и электрическое сопротивление. Ампер, вольт, ом (96); 40. Закон Ома (101); 41. Последовательное и параллельное соединения (104); 42. Тепловые действия тока (110); 43. Химические действия тока. Электролиз. Законы Фарадея. Аккумуляторы и гальванические элементы (112); 44. Прохождение тока через газы (119); 45. Электромагнит. Магнитная цепь (125);	

46. Механическое действие магнитного поля на электрический ток. Закон Ленца (129); 47. Основные электроизмерительные приборы. Амперметр и вольтметр (135); 48. Электрическая энергия и работа тока. Мощность электрического тока. Ватт, киловатт. Киловатт-час (141); 49. Закон электромагнитной индукции (147); 50. Самоиндукция (149); 51. Взаимная индукция (154); 52. Переменный ток (157); 53. Трехфазный переменный ток. Вращающееся магнитное поле (170).

Глава пятая. Электромагнитные генераторы тока. Электрические станции 179—203

54. Динамомашины постоянного тока (179); 55. Однофазные и трехфазные генераторы переменного тока (189); 56. Электрические станции (195).

Глава шестая. Передача и распределение электрической энергии. Электрические подстанции . . 203—236

57. Общая схема снабжения приемников электрической энергией от генераторных станций (203); 58. Линии электрической передачи (209); 59. Распределение электрической энергии (220); 60. Электрические подстанции (225).

Глава седьмая. Электрическое освещение 236—249

61. Общие сведения из области светотехники (236); 62. Лампы накаливания (241); 63. Дуговые лампы и другие источники света. (244).

Глава восьмая. Электродвигатели и их применения . . 250—273

64. Электродвигатели постоянного тока (250); 65. Электродвигатели переменного тока (252); 66. Применение электродвигателей в промышленности (262); 67. Электрическая тяга (264); 68. Применения электродвигателей для обслуживания зданий и в домашнем быту. (272).

Глава девятая. Электрическое нагревание, электросварка, применения электрической энергии в металлургии и в химической промышленности. Прочие применения электрической энергии 274—307

69. Электрическое нагревание (274); 70 Электросварка (278); 71. Применения электрических печей в металлургии и в химической промышленности (281); 72. Электрохимическая промышленность (286); 73. Электрическая очистка газов (292); 74. Электросвязь Электрическая сигнализация и управление (294).

Алфавитный указатель 308

ГЛАВА ПЕРВАЯ РАБОТА И ЭНЕРГИЯ

1. МЕХАНИЧЕСКАЯ РАБОТА

Когда паровоз тянет поезд, совершается работа. Работа эта производится паровозом, который силой своей тяги преодолевает разного рода сопротивления, противодействующие движению поезда. Среди таких сопротивлений одно из главных мест обычно занимает сопротивление, испытываемое при передвижении колес по рельсам, а также трение осей в подшипниках. Кроме того при больших скоростях движения поезда значительное сопротивление этому движению оказывает воздух. Наконец, если поезд еще не достиг установленной для него наибольшей скорости, сила тяги паровоза отчасти идет на увеличение скорости движения поезда, или, как говорят, на преодоление инерции¹ поезда, т. е. на преодоление его стремления сохранять неизменной ту скорость, с которой он уже движется. Мы ведь знаем из повседневного опыта, что всякое тело, например, какой-либо камень, стремится сохранять свое состояние покоя или движения и для того, чтобы привести тело в движение или изменить уже существующую скорость его движения, необходимо подействовать на него какой-либо внешней силой. При изложении законов движения силу, могущую привести тело в движение или изменить скорость его движения, называют м е х а н и ч е с к о й с и л о й, а работу, которая совершается под действием этой силы, — м е х а н и ч е с к о й р а б о т о й². В тех случаях, когда вполне ясно, о чем идет речь, мы можем иногда просто говорить о силе и о работе. Однако, если оказывается необходимым особенно отчетливо подчеркнуть, что мы говорим не о чем другом, а именно о силе, стремящейся произвести какое-либо перемещение, мы будем пользоваться выражением м е х а н и ч е с к а я с и л а.

Итак, мы можем сказать, что паровоз, передвигая поезд, совершает механическую работу благодаря своей силе тяги,

¹ Латинское слово «инерция» обозначает «лень», «неподатливость».

² Слово «механический» происходит от греческого слова «механѣ», что значит «машина».

которая и является механической силой, приложенной к поезду, т. е. действующей со стороны паровоза на поезд. Здесь необходимо обратить особое внимание на то обстоятельство, что совершающая работу механическая сила действует в направлении передвижения поезда. Всегда, вообще, когда под влиянием каких-либо механических сил совершается работа, в ней принимает участие только та часть данных сил, которая действует в направлении движения перемещаемого тела.

Величину механической силы обычно выражают в каких-либо общепринятых единицах. В настоящее время в технике весьма часто пользуются единицей силы, называемой килограмм-силой, или сокращенно, хотя и не совсем точно, просто килограммом. Это есть та сила, с которой притягивается к земле гиря в один килограмм или вообще тело, весящее один килограмм¹. Таким образом говорят о механической силе в один килограмм, в десять килограммов, в двадцать килограммов, в тысячу килограммов и т. п. Во многих случаях для измерения механической силы применяют также единицы, во много раз меньшие килограмма-силы, например, сила, называемая дина². Она приблизительно в миллион раз меньшая килограмма-силы. Но мы здесь этого касаться не будем, так как существо дела от этого не зависит. Работа, производимая какой-либо механической силой, действующей в направлении передвижения тела, к которому она приложена, тем больше, чем больше сама механическая сила и чем больше путь, пройденный движущимся телом. В связи с этим работа измеряется произведением механической силы на величину перемещения тела, на которое действует данная сила в направлении его движения. Поэтому можно написать:

$$\text{работа} = \text{сила} \times \text{перемещение}.$$

Если перемещение, т. е. путь, пройденный телом, выражается в метрах, а механическая сила — в килограммах, то работа выразится в единицах, которые называются килограммометрами (кгм).

Один килограмметр есть работа, которая совершается механической силой в один килограмм при перемещении точки приложения этой силы на один метр в направлении действия силы.

¹ Вообще говоря, сила, с которой притягивается к земле какое-либо тело, несколько зависит от того, в каком именно месте земной поверхности расположено данное тело и на какой высоте. Поэтому при точном определении килограмм-силы условились иметь в виду вес гири в 1 килограмм в строго определенных условиях.

² Слово «дина» происходит от греческого слова «динамис», что означает «сила».

Мы можем, следовательно, так выразить определенные единицы механической работы:

$$1 \text{ килограммометр} = 1 \text{ килограмм} \times 1 \text{ метр.}$$

Если, например, тело весом в 3 килограмма мы поднимаем на высоту 7 метров, то в таком случае нами будет совершена работа:

$$3 \text{ килограмма} \times 7 \text{ метров} = 21 \text{ килограммометру.}$$

Если некоторый груз перемещается по поверхности пола на 4 метра и при этом приходится тянуть груз с силой в 15 килограммов, то совершенная механическая работа будет равна:

$$15 \text{ килограммов} \times 4 \text{ метра} = 60 \text{ килограммометров.}$$

Если паровоз при силе тяги в 2 000 килограммов продвинет поезд на 25 километров, т. е. на 25 000 метров, то паровоз совершит при этом работу:

$$2\,000 \text{ килограммов} \times 25\,000 \text{ метров} = 50\,000\,000 \text{ килограммометров.}$$

Подобных примеров можно привести бесчисленное множество. Всегда в этих случаях, умножая силу, выраженную в килограммах, на число метров, получим величину произведенной механической работы, выраженную в килограммометрах.

2. ЭНЕРГИЯ

В разобранный выше примере паровоза, выполняющего работу передвижения поезда, имеет большое значение вопрос о том, за счет чего производится работа. Совершенно очевидно, что в паровозе есть что-то, позволяющее ему производить работу. Очевидно, паровоз обладает каким-то запасом, за счет которого выполняется работа. Внешним признаком этого запаса, делающего паровоз способным производить работу, является топливо, которым снабжен данный паровоз. Топливо сжигается в топке паровоза при притоке внешнего воздуха, и образующееся тепло идет на испарение воды в котле. При этом водяной пар скопляется в котле и сжимается там до более или менее высокого давления. Затем сжатый пар, переходя в цилиндры и расширяясь в них, приводит в движение поршни и другие части паровой машины, сообщаящие вращение ведущим колесам паровоза. Строгое обследование указанных обстоятельств позволяет нам утверждать, что непосредственным источником работы паровоза является сжатый водяной пар, скопляющийся в котле паровоза. Именно сжатый пар обладает способностью производить механи-

ческую работу. То, благодаря чему сжатый пар обладает этой способностью, мы называем энергией¹. Мы обычно говорим: сжатый пар обладает запасом энергии, которая при наличии надлежащих условий превращается в механическую работу. Но не только сжатый пар обладает энергией, т. е. способностью производить работу. Можно привести много других примеров, когда какое-либо тело или несколько тел, вместе взятых, являются носителями энергии.

Вообще в природе имеются неисчерпаемые запасы энергии разного рода, о чем кратко скажем дальше. Иногда самопроизвольно, иногда при посредстве создаваемых человеком специальных приспособлений и механизмов за счет этих запасов энергии совершается механическая работа. Одним словом, запасы энергии могут превращаться в механическую работу. Возможность подобного превращения является одним из самых главных свойств энергии. Если нет никаких запасов энергии, не может быть произведена никакая механическая работа.

Так как энергия может превращаться в механическую работу, то запасы энергии принято выражать в тех же единицах, которыми измеряется работа. Мы можем, следовательно, выражать запасы энергии в указанных выше единицах работы, т. е. килограммометрах. Например, в некотором частном случае запас энергии сжатого пара в паровозе может равняться 200 000 килограммометров и т. п.

3. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Рассматривая работу паровоза, мы указали, что непосредственным источником этой работы необходимо считать энергию сжатого пара, скопляющегося в котле паровоза. Для дальнейшего выяснения вопроса об энергии вообще полезно остановиться еще на ряде случаев, в которых мы встречаемся с различными видами энергии.

Вместе с тем необходимо иметь в виду следующее весьма важное обстоятельство. Различные виды энергии могут преобразовываться друг в друга. Энергия одного вида может превращаться в энергию другого вида. Но никогда энергия какого бы то ни было вида не может возникнуть из ничего или совершенно исчезнуть, превратившись в ничто. При разного рода преобразованиях энергии определенное начальное количество килограммометров энергии данного вида может превратиться в другие виды энергии и в механическую работу только таким образом, что сумма килограммометров других

¹ Греческое слово «энергѳа» обозначает «деятельность», «работоспособность».

видов энергии и килограммометров полученной работы оказывается равной начальному количеству килограммометров. Это есть так называемый закон сохранения энергии.

4. ЭНЕРГИЯ ДВИЖЕНИЯ ИЛИ КИНЕТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Всякое движущееся тело обладает запасом энергии именно вследствие того, что оно движется. Этот вид энергии принято называть энергией движения или кинетической энергией¹. Так, брошенный и движущийся с некоторой скоростью камень обладает кинетической энергией, за счет которой может совершаться механическая работа в случае встречи летящего камня с каким-либо другим телом. Если, например, летящий камень столкнется с другим — неподвижным — камнем, силой удара этот последний может быть передвинут на некоторое расстояние, причем совершится механическая работа за счет кинетической энергии летящего камня. Допустим, что летящий камень весит 1 килограмм и движется со скоростью 15 метров в секунду. Подсчет показывает, что в этом случае кинетическая энергия летящего камня равна приблизительно $11\frac{1}{2}$ килограммометрам. В случае если бы кинетическая энергия данного летящего камня полностью израсходовалась на совершение механической работы, эта работа была бы равна тем же $11\frac{1}{2}$ килограммометрам. Пуля весом в 20 грамм, вылетающая из дула винтовки со скоростью 800 метров в секунду, обладает кинетической энергией около 650 килограммометров. Наличием столь значительной кинетической энергии летящей пули объясняется ее большое разрушительное действие. Всем хорошо известны ветровые двигатели. Механическая работа в них получается за счет именно кинетической энергии воздуха, движущегося с достаточно большой скоростью. При сильном ветре кинетическая энергия воздуха бывает иногда столь велика, что происходят огромные разрушения, причем ветром производится механическая работа при переносе различных тяжелых предметов (срываемых крыш зданий и т. п.) на значительные расстояния.

Как показывает опыт, при столкновении движущегося тела с другим телом не вся кинетическая энергия движущегося тела превращается в механическую работу. Часть кинетической энергии превращается в тепло, причем обычно температура сталкивающихся тел повышается.

¹ Греческое слово «κίνημα» значит «движение».

5. ТЕПЛОВАЯ ЭНЕРГИЯ

Тепло есть весьма распространенный в природе вид энергии. Вместо слова «тепло» иногда говорят *тепловая энергия*.

Современная наука с достоверностью установила, что тепловое состояние всякого вещества связано с непрерывным беспорядочным движением мельчайших частиц, скопление которых образует различные вещества. Частицы эти столь малы, что их нельзя увидеть даже в самые сильные микроскопы¹, но их существование совершенно несомненно доказано.

Сравнительно простыми движениями обладают частицы газов и паров, например, частицы воздуха или водяного пара. Всякий газ или пар состоит из огромного количества ничтожных по своим размерам частиц, которые беспорядочно движутся по всевозможным направлениям, почти всегда прямолинейно, с большими скоростями, достигающими сотен и тысяч метров в секунду. Газовые частицы непрерывно сталкиваются одна с другой и после каждого столкновения разбегаются в разные стороны, до некоторой степени подобно упругим мячам. Чем более нагрет газ, тем больше скорости его частиц. И наоборот: чем холоднее газ, тем меньше скорости его частиц. Если газ или пар заключен в какой-либо сосуд, движущиеся частицы все время ударяются также о стенки сосуда и таким образом оказывают на них давление. Часто мы этого не замечаем, потому что давление газа оказывается одинаковым с обеих сторон стенки. Но если, при некоторой одинаковой густоте частиц, с одной стороны стенки газ более нагрет, т. е. скорость движения его частиц больше, чем у газа с другой стороны стенки, или если с одной стороны стенки газ более сжат, т. е. частицы в нем образуют более густое скопление, чем с другой стороны, то общее давление на стенку, происходящее от ударов частиц газа (или пара), будет больше с той стороны, где находится нагретый или сжатый газ (или пар). Например, мы не замечаем давления воздуха на наши щеки, так как оно обычно бывает одинаково снаружи и изнутри. Но если мы, закрыв рот, наберем в него побольше воздуха из легких, то наши щеки надуются благодаря тому, что давление воздуха изнутри станет больше, чем снаружи. Подобным же образом горячий и сжатый водяной пар, поступая из котла паровоза в цилиндр его паровой машины, с большой силой давит на поршень и, пере-

¹ Микроскопом (от греческих слов «микрос» — «малый, очень малый» и «скопёо» — «смотрю») называется прибор, главную часть которого составляет несколько надлежащим образом расположенных увеличительных стекол, позволяющих видеть рассматриваемый предмет увеличенным во много раз.

двигая его, совершает механическую работу за счет кинетической энергии частиц пара. Непосредственным опытом доказано, что после совершения механической работы расширяющимся газом или паром температура его понижается, т. е. уменьшается скорость движения его частиц, уменьшается их кинетическая энергия. Иными словами, совершение механической работы расширяющимся газом или паром сопровождается соответствующим уменьшением запаса их тепловой энергии.

В веществах, находящихся в газообразном состоянии, т. е. в газах и парах, частицы в общем очень слабо притягиваются одна к другой. Поэтому они стремятся разбежаться во все стороны, и удержать газ или пар в некотором определенном объеме можно, только заключив его в соответствующий сосуд. В телах же жидких и твердых, каковы, например, вода и лед, благодаря значительно более густому скоплению частиц и уменьшению среднего расстояния между ними, берут верх силы взаимного притяжения или сцепления между ними, препятствующие им свободно разбежаться во все стороны. Необходимо при этом отметить, что силы сцепления между частицами твердых тел значительно больше, чем у жидких тел. Поэтому твердые тела стремятся сохранять свою форму, в то время как тела жидкие обладают текучестью и легко изменяют свою форму. В связи со всем сказанным выше движение частиц, из которых состоят жидкие и твердые тела, имеет более сложный характер, чем у тел газообразных, но всегда тепловое состояние и запас тепловой энергии жидких и твердых тел также полностью определяются кинетической энергией составляющих их частиц, т. е. зависят от скоростей движения этих частиц.

Как было указано выше, тепло есть очень распространенный в природе вид энергии. Всякие другие виды энергии весьма легко превращаются в тепловую энергию, т. е. в энергию беспорядочного движения мельчайших частиц, образующих различные тела, с которыми мы обычно имеем дело в нашем повседневном опыте. Кроме того необходимо отметить, что при всяком совершении механической работы благодаря существованию разного рода трений большая или меньшая часть этой работы превращается в тепло. Примеры подобного превращения механической работы в тепло мы встречаем на каждом шагу. При трении двух кусков дерева друг о друга они нагреваются. Когда мы движем куски дерева просто руками, то механическая работа, совершаемая нашей мускульной силой, превращается в тепло трения. В случае если дерево взято очень сухое, то образование тепла при трении может довести дерево до загорания. На этом именно основан распространенный среди некоторых первобытных народов способ добывания огня. Мы знаем далее,

что во всякой машине трущиеся части нагреваются. Это бывает особенно заметно в подшипниках, и приходится применять надлежащую смазку для уменьшения в них трения и нагревания. Когда мы снимаем на станке стружку с обрабатываемого металлического предмета, то эта стружка и самый резец весьма сильно нагреваются. Нагревается и обрабатываемый предмет.

6. ХИМИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Когда дерево или какое-либо иное топливо горит, образуется тепло. За счет чего образуется это тепло? Изучение этого случая и многих других, ему подобных, приводит к заключению, что мы здесь имеем дело с проявлением так называемой химической¹ энергии, которая в скрытом виде заключается во многих телах природы и которая обнаруживается, когда эти тела взаимодействуют так, что при этом образуются новые по своему составу тела. При горении топлива имеет место химическое взаимодействие составных частей топлива и газа кислорода, который входит в состав воздуха. Без притока воздуха топливо, как известно, не горит. В результате горения топлива образуются газообразные соединения кислорода с составными частями топлива. Во многих случаях топливо сгорает не полностью, и при этом от него остаются зола, уголь, сажа и т. п.

Итак, при горении топлива образуется тепло за счет химической энергии, которой обладает смесь топлива и кислорода воздуха. Здесь химическая энергия превращается в тепловую энергию.

В разобранный выше примере паровоза, совершающего механическую работу передвижения поезда, мы встречаемся со следующими последовательными преобразованиями энергии. Топливо в совокупности с кислородом воздуха, поступающего в топку во время горения, обладает основным запасом энергии, именно запасом химической энергии. При сжигании топлива этот запас химической энергии мало-помалу превращается в тепловую энергию раскаленных газообразных продуктов горения, которые, омывая испарительные поверхности котла, содержащего воду, передают воде свое тепло через теплопроводящие стенки котла и заставляют ее кипеть. При этом образующийся водяной пар, скопляющийся в котле и сжимающийся там до более или менее высокого давления,

¹ Химия — наука, занимающаяся изучением однородных веществ, из которых состоят различные тела, превращениями этих веществ и явлениями, сопровождающими эти превращения. Слово «химия» очень древнего происхождения, не вполне выясненного.

оказывается носителем значительной доли тепловой энергии, притекшей от раскаленных продуктов горения. Далее, этот гар поступает в цилиндры паровой машины паровоза и двигает поршни, совершая через посредство промежуточных частей механическую работу передвижения поезда.

Выделение тепла при горении топлива в кислороде воздуха представляет собой лишь один из многочисленных примеров освобождения скрытой энергии во время химических взаимодействий, или, как говорят, химических реакций¹. Подобное же превращение скрытой химической энергии в тепло наблюдается в целом ряде других случаев. Всем известно, например, что при гашении извести, обычно применяемой для строительных целей, происходит очень сильное нагревание, когда хорошо обожженная известь жадно поглощает воду, набухая, разрыхляясь и образуя водное соединение извести, так называемую гашеную известь. Когда крепкая серная кислота соединяется с водой, также происходит обильное выделение тепла. Подобным же выделением тепла сопровождается и воздействие водных растворов серной кислоты на некоторые металлы, когда образуются сернокислые соли этих металлов, и т. д.

Но не только в виде тепла может проявляться химическая энергия, освобождающаяся при реакциях. Иногда химическая энергия превращается и в другие виды энергии, кроме тепла. Об этом еще будет речь в дальнейшем.

7. ЭНЕРГИЯ ПОЛОЖЕНИЯ, ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ

Если какое-либо тело, например, камень или гиря часов, поднято на некоторую высоту и затем ему будет предоставлена возможность падать, то во время этого падения может быть совершена механическая работа силой притяжения данного тела к земле. Гиря часов, медленно падая, в течение всего своего опускания совершает работу, приводя в движение все части механизма часов и в частности передвигая стрелки. Следовательно, подтянутая кверху гиря обладает некоторым запасом энергии. Запас энергии в гире будет тем больше, чем больше вес гири и чем больше высота, на которую она поднята. Так как рассматриваемый вид энергии зависит не от какого-либо движения данного тела, а именно от расположения тела относительно другого тела (например, притягивающей его земли), то принято эту энергию называть энергией положения. Иногда вместо названия «энер-

¹ Латинское слово «реакцио» обозначает «обратное действие», «взаимное действие».

гия положения» применяют название «потенциальная энергия»¹.

Обычно при опускании вниз гири или какого-либо иного тела используется не вся потенциальная энергия (энергия положения), которой обладает данное тело, но только некоторая часть ее, именно — часть, соответствующая опусканию тела до предела, зависящего от окружающей обстановки. Например, гиря часов опускается лишь на столько, на сколько это позволяет длина цепочки или шнура, на которых подвешена гиря. Если бы эта длина была больше, то мы могли бы использовать больше из запаса потенциальной энергии, которым вообще обладает гиря в верхнем положении. Когда мы подтягиваем гирю из нижнего положения в верхнее, мы совершаем силой наших рук механическую работу, преодолевая притяжение гири к земле, и эта механическая работа расходуется на восстановление той части потенциальной энергии гири, которая была израсходована при опускании ее во время хода часов. Таким образом на примере часовой гири мы отчетливо видим, как потенциальная энергия (энергия положения) превращается в механическую работу, идущую в данном случае на приведение в движение механизма часов, и как потом эта потенциальная энергия восстанавливается до первоначальной величины во время подъема гири и совершения механической работы внешней силой, которая в данном случае является силой наших рук.

Благодаря неровностям поверхности земли, благодаря тому, что на поверхности земли мы встречаемся с местами более высокими и более низкими, вода, собирающаяся на возвышенных местах вследствие дождей или таяния снегов и льда, течет и падает вниз. В этом случае проявляется потенциальная энергия (энергия положения) воды. Всем хорошо известно, что эта водная энергия может быть использована для практических целей и получения механической работы при помощи особых водяных двигателей — мельничных колес и турбин². Обычно принято называть водную энергию гидравлической энергией, а водяные двигатели — гидравлическими³ двигателями. Применение гидравлических двигателей в настоящее время очень распространено. Везде, где только возможно, человек стремится

¹ От латинского слова «потэнциа», что обозначает «власть», «возможность». Здесь имеется в виду скрытая возможность совершения механической работы.

² Слово «турбина» происходит от латинского слова «турбо», что значит «вращение». Водяная турбина есть более совершенный двигатель, чем простое мельничное колесо.

³ От греческого слова «гюдор» (родительный падеж — «гюдрос», что значит «вода».

использовать потенциальную энергию воды, т. е. гидравлическую энергию.

Потенциальной энергией может обладать некоторое тело не только в связи с расположением его относительно другого тела (в рассмотренных выше случаях — относительно земли), но и в связи с изменениями взаимного расположения отдельных частей данного тела, т. е. в связи с изменением формы тела. Особенно отчетливо проявляется этот вид потенциальной энергии в так называемых упругих телах. Для изменения их формы необходимо затратить соответствующую механическую работу, которая может быть получена обратно, когда упругому телу предоставляется возможность принять первоначальную форму. Так, например, стальная часовая пружина при заводке часов изменяет свою форму и приобретает некоторый запас потенциальной энергии за счет механической работы, совершенной во время заводки. При раскручивании пружины эта запасенная в ней энергия возвращается обратно в виде механической работы, расходуемой на движение механизма часов.

8. ЛУЧИСТАЯ ЭНЕРГИЯ

Скажем теперь несколько слов о так называемой *лучистой энергии*, особенно интересной для нас в том отношении, что по природе своей она очень близка к электрической энергии, о которой мы должны подробно говорить в этой книге.

Когда в холодный ветреный день мы греемся у костра, обычно мы располагаемся так, чтобы горячий воздух вместе с дымом не попадал нам в лицо, и, несмотря на это, мы все же согреваемся. Энергия особого вида доходит до нас даже против ветра и, падая на поверхность нашего тела, превращается в тепло. Следовательно, эта энергия не связана непосредственно с воздухом, а распространяется во все стороны от костра, независимо от того, в какую сторону дует ветер. Этот же вид энергии несется к нам, на землю, с лучами солнца. Отсюда и происходит название «лучистая энергия». Она излучается солнцем во все стороны и распространяется сквозь пустое в обычном смысле слова пространство с громадной скоростью, равной 300 000 километров в секунду. Часть лучистой энергии воспринимается нашими глазами в виде света. Падая на некоторые тела, лучистая энергия может производить в них химические действия. На этом основана фотография¹. Во многих случаях химические действия

¹ Название это происходит от греческих слов: «фос» (родительный падеж — «фотос») — «свет» и «графо» — «пишу».

лучистой энергии сопровождаются преобразованием ее в скрытую химическую энергию различных тел. В частности, разные виды топлива, как, например, дерево, каменный уголь, торф, обязаны своим запасом химической энергии воздействию на растения со стороны лучистой энергии солнца, поглощаемой растениями во время их произрастания. Вообще лучистая энергия может производить весьма разнообразные действия и может преобразовываться в различные другие виды энергии. Но среди подобных всевозможных преобразований особенное значение имеет способность лучистой энергии переходить в форму тепловой энергии тех тел, на которые она падает на пути своего распространения.

Рассмотренные случаи излучения энергии (горящим костром и солнцем) могут подать повод думать, будто бы источниками ее могут служить только нагретые светящиеся тела. В действительности это не так. Лучистая энергия может испускаться и темными телами, например, стенками нагретой печи, а также некоторыми совершенно холодными предметами, если в них совершаются особые физические явления, как это, например, имеет место в отправительных устройствах радиостанций.

В общем ходе явлений, происходящих в природе, мы на каждом шагу встречаемся с преобразованиями энергии и с переходом ее от одного тела к другому. При этом весьма часто переход энергии совершается через посредство лучистой энергии. Солнце, являющееся центральным источником энергии в той группе небесных тел, к которой принадлежит и наша земля, из своего огромного запаса посылает энергию в окружающее пространство в виде лучистой энергии. Часть этой излученной солнцем энергии падает на нашу землю, согревая ее, освещая ее и поддерживая на ней условия, необходимые для существования растительности и животного мира.

Упомянутая выше гидравлическая энергия по существу является следствием преобразования лучистой энергии солнца. Дело в том, что за счет тепла, в которое преобразуется у поверхности земли эта энергия, происходит сначала испарение воды в океанах, морях, реках и в других низко расположенных водоемах, а затем восхождение возникающих при этом паров воды вверх, где из них образуются облака. Далее, облака разносятся ветрами над всей земной поверхностью и из них падают водяные осадки в виде дождя, снега и града, между прочим и на возвышенные, гористые места, на которых таким образом скопляется вода, обладающая потенциальной энергией. За счет этой энергии может совершаться механическая работа при переходе и падении воды в более низко расположенные места. Следовательно, можно

утверждать, что гидравлическая энергия возникает благодаря преобразованию в нее части солнечной лучистой энергии, приходящейся на долю земли.

9. ЭФИР — НОСИТЕЛЬ И ПЕРЕДАТЧИК ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

До рассмотрения простейших примеров лучистой энергии мы касались различных других видов энергии, причем было совершенно очевидно, что эти другие виды энергии существуют не сами по себе, а тесно связаны с какими-либо обычными телами, т. е. с так называемой весомой материей, или веществом. Именно мы говорили о тепловой энергии пара в котле паровоза, о кинетической энергии летящего камня или пули, о химической энергии топлива и кислорода воздуха, о потенциальной энергии подтянутой кверху часовой гири или воды, скопившейся в высоко расположенных водоемах. В случае лучистой энергии дело обстоит несколько иначе. Когда она распространяется от горящего костра, сколь угодно сильный ветер, дующий навстречу ее движению, не преграждает доступа лучистой энергии к поверхности нашего тела, расположенного у костра со стороны ветра. Таким образом мы заключаем, что воздух не принимает непосредственного участия в передаче лучистой энергии. Она распространяется как-то помимо воздуха, хотя и проходит сквозь воздух. С другой стороны, лучистая энергия, как мы указывали выше, распространяется даже через так называемую пустоту, т. е. через пространство, в котором совершенно нет ни воздуха, ни какого-либо иного газа или пара, ни каких-либо жидких и твердых тел, в котором, следовательно, нет никакого обычного вещества. Во время своего распространения вообще и во время своего распространения через пустоту в частности, лучистая энергия движется как бы совершенно самостоятельно, полностью отделившись от излучающего его тела, например солнца, и еще не успев поглотиться каким-либо стоящим на пути телом.

Таким образом может показаться, что лучистая энергия обладает способностью проходить через пустоту, не будучи с чем-либо связанной. Однако, совершенно недопустимо предположение, будто бы энергия может существовать сама по себе, без какой-либо материальной основы, которая являлась бы носителем этой энергии. Но и независимо от этого необходимо признать, что настоящей пустоты в действительности быть не может. Если бы мы допустили существование такой пустоты, то это означало бы, что мы считаем возможным, чтобы в природе рядом с различными телами существовало «ничто». Ведь настоящая пустота есть подлинное ничто. А ничто есть воображаемое, не могущее иметь места в нашем

материальном мире. Следовательно, и настоящая пустота есть лишь воображаемое, чего не бывает в природе. То, что нам иногда кажется пустотой, на самом деле должно быть чем-то заполнено. Человеческая мысль, давно и много работавшая над объяснением явлений природы, пришла к предположению, что весь существующий мир совершенно заполнен чем-то материальным, что проникает через все явно ощущаемые нами тела и находится в промежутках между ними, где, как нам кажется, будто бы ничего нет. Это нечто материальное принято называть эфиром¹. Таким образом надо полагать, что так называемая пустота есть пространство, заполненное эфиром. В этом эфире и происходят все те особые явления, которые сопровождают распространение лучистой энергии. Следовательно, необходимо считать, что именно эфир является носителем и передатчиком лучистой энергии.

10. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭНЕРГИЯ

Тщательное изучение лучистой энергии показывает, что в каждой точке на пути ее распространения в эфире обнаруживаются некоторые особые свойства, о которых дальше мы будем говорить более подробно, когда перейдем к рассмотрению электрических и магнитных явлений. В этом именно и заключается сближение лучистой энергии и электрической энергии. Лучистая энергия имеет самую тесную связь с электромагнитными явлениями, происходящими в эфире. Можно сказать даже больше того. Лучистая энергия есть лишь одна из разновидностей той электромагнитной энергии, которую ради краткости и ввиду общепринятой привычки иногда называют просто электрической энергией. Рассмотрению этой энергии и ее свойств посвящена вся настоящая книга.

11. ЭНЕРГИЯ, ИЗЛУЧАЕМАЯ РАДИОСТАНЦИЯМИ

Итак, в каждой точке на пути распространения лучистой энергии в эфире совершается некоторое электромагнитное явление. В данном случае оказывается, что явление это все время как-то изменяется по своей напряженности, последовательно принимая всевозможные значения в известных пределах и, как говорят, периодически² повторяясь. Это значит, что в каждой точке через определенный промежуток

¹ Слово «эфир» — греческого происхождения и в древности применялось для обозначения очень разреженного вещества, якобы заполняющего небесные пространства.

² Греческое слово «периодос» обозначает «повторяющийся в круговую путь», «круговорот», а также время этого круговорота.

времени, называемый временем полного периода, или просто периодом, электромагнитное явление вновь претерпевает те же изменения, которые имели место в течение предыдущего такого же промежутка времени. Подобного рода изменения принято называть периодическими колебаниями. Слово «колебания» здесь нужно понимать в самом общем смысле, а не так просто, как, например, в случае колебания маятника часов, когда мы имеем дело с качанием подвешенного грузика вперед и назад. Можно говорить о периодических колебаниях температуры воздуха в течение, скажем, месяца: днем тепло, ночью холодно, на следующий день опять тепло, затем ночью вновь холодно и т. д. Точно так же мы можем говорить о периодических колебаниях освещенности земли солнцем: днем светло, ночью темно и т. д. В этом же общем смысле принято называть электромагнитными колебаниями те периодические изменения, которые совершаются в эфире в каждой точке на пути распространения лучистой энергии.

Когда происходят какие бы то ни было колебания, представляет известный интерес вопрос о том, насколько часто совершаются эти колебания. В отношении частоты электромагнитных колебаний, которые имеют место в эфире при распространении лучистой энергии, современная наука дает вполне определенный ответ для каждого частного случая. Для так называемых световых колебаний, т. е. для случая лучистой энергии, воспринимаемой нашим глазом в виде света, частота колебаний очень велика — многие миллионы миллионов периодов в секунду. При понижении частоты колебаний мы уже перестаем воспринимать лучистую энергию как свет и ощущаем ее только по ее тепловым действиям на наше тело. Наконец, в настоящее время всем хорошо известна лучистая энергия сравнительно небольшой частоты колебаний. Эта разновидность лучистой энергии широко применяется в беспроволочной телеграфии и телефонии, т. е. в радиотехнике¹. Отправительные устройства радиостанций являются источниками распространяющейся во все стороны лучистой энергии, которая по своей сущности совершенно подобна свету и отличается от него только частотой колебаний. На практике применяются радиочастоты примерно от тысячи миллионов до ста тысяч периодов в секунду. И все это — также электромагнитные колебания, по природе своей подобные колебаниям, воспринимаемым нами в виде света,

¹ Латинское слово «*ра́диус*» между прочим обозначает «луч солнца», «луч света» и вообще «луч». Радиотехника есть область практических применений электромагнитной энергии, излучаемой особыми устройствами, обычно называемыми радиостанциями.

и также распространяющиеся со скоростью 300 000 километров в секунду. Количественная разница — только в частоте колебаний.

12. ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ ВДОЛЬ ПРОВОЛОКИ

Опыт показывает, что лучистая энергия сама по себе стремится распространяться прямолинейно. Однако, если на ее пути встречаются какие-либо тела, она может претерпевать в зависимости от обстоятельств большее или меньшее отклонение от первоначального направления. Например, солнечные лучи при косом падении на поверхность стекла, воды и других прозрачных тел изменяют свое направление. При этом обычно часть лучистой энергии отражается от встретившейся поверхности. Такое отражение бывает особенно сильным и заметным при падении света на хорошо отполированную металлическую поверхность, т. е. на так называемое зеркало. По мере понижения частоты колебаний, свойственных лучистой энергии, в особенности при переходе к сравнительно низким частотам, применяемым в области радиотехники, обнаруживается способность лучистой энергии распространяться вдоль поверхности металлического тела, с которым эта энергия встречается. Если, например, металлическое тело имеет форму длинной проволоки, протянутой хотя бы и не прямолинейно, а как угодно отклоняющейся в сторону от прямого направления, то излученная радиостанцией электромагнитная энергия, попадающая на поверхность данной проволоки, вообще говоря, в дальнейшем как бы *связывается* некоторым образом с проволокой и распространяется вдоль нее, следуя строго за всеми возможными поворотами. В конце концов эта энергия приходит туда, куда ее ведет проволока и где она может быть принята для того или иного использования, например, для приведения в действие различных радиоприемников.

Таким образом в рассмотренном случае электромагнитная энергия, связанная с проволокой, движется вдоль этой проволоки как бы вдоль некоторых рельсов. Вместе с тем обыкновенно часть электромагнитной энергии непрерывно проникает внутрь самой проволоки и здесь возбуждает добавочные явления электромагнитного же характера, а затем в конце концов превращается в тепло, которое нагревает проволоку. На обычном языке, которым мы будем в дальнейшем пользоваться, вся совокупность указанных явлений, протекающих как в эфире, близ проволоки, так и в самой проволоке, характеризуется словами: *по проволоке течет электрический ток*.

В следующих главах этой книги мы более подробно остановимся на наиболее существенных обстоятельствах, с которыми приходится встречаться в различных случаях прохождения электрического тока по проволоке, а также рассмотрим основные законы, которым подчиняется электрический ток. Вместе с тем мы познакомимся с некоторыми устройствами, позволяющими вырабатывать электрическую (электромагнитную) энергию в количествах, необходимых для разного рода практических применений.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

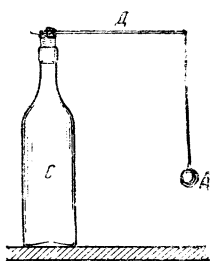
13. ПРОИСХОЖДЕНИЕ СЛОВА «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО»

Уже очень давно было известно, что некоторые тела, например, твердые смолистые вещества, после натирания их сухой шерстью, мехом или даже просто сухой рукой приобретают способность притягивать легкие предметы — соломинки, кусочки сухих листьев, лоскутки бумаги и т. п. Особенно отчетливо еще в глубокой древности эти свойства наблюдались у янтаря, представляющего собой одну из разновидностей окаменелой смолы. Древние греки употребляли слово «электрон» для обозначения янтаря. Отсюда и произошло современное наименование описываемых явлений, которые теперь обычно называются электрическими. Внимательное изучение этих явлений показывает, что на поверхности тел, обладающих свойством притягивать легкие предметы, находится нечто, чего нет у подобных же тел, не подвергавшихся предварительному натиранию. Принято называть электричеством это «нечто», обнаруживающееся на поверхности некоторых тел в местах натирания. Сами же тела в таких случаях называются наэлектризованными. Отдел науки, посвященный рассмотрению электрических явлений, происходящих в случае неподвижности наэлектризованных тел и когда само электричество, на них находящееся, кажется нам неподвижным, принято называть электростатикой¹.

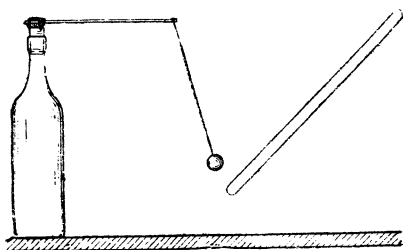
14. ПРОСТЕЙШИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ И ОПЫТЫ С НИМИ

Для производства простейших опытов с наэлектризованными телами можно, например, воспользоваться палочкой сургуча или изготовить палочку толщиной приблизительно

¹ На латинском языке «ста́ре» значить «стоять», а «ста́тус» означает «неподвижное состояние».



Фиг. 1. Простейший прибор для производства опытов с электризацией тел.

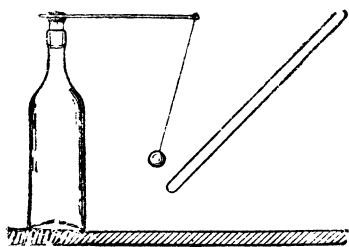


Фиг. 2. Притяжение ненаэлектризованного шарика к наэлектризованной смоляной палочке.

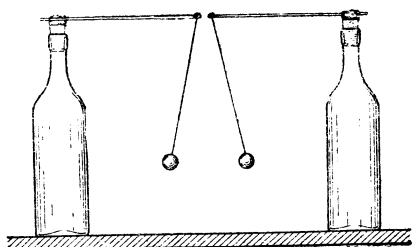
с палец из черной смолы, известной под названием сапожного вара, к которому полезно ради твердости и прочности добавить некоторое количество канифоли. При этом сапожный вар необходимо сначала разогреть, поместив в какой-либо котелок, и сделать жидким, а потом туда же добавить канифоли в количестве, равном примерно $\frac{1}{4}$ или $\frac{1}{3}$ от веса взятого вара. После расплавления канифоли следует хорошо перемешать смесь смол и затем, дав ей немного остынуть, вылить полужидкую массу в соответствующую формочку, сделанную хотя бы из слегка смоченной бумаги, которую после остывания смоляной палочки можно легко развернуть. Случайно прилипшие к смоле кусочки бумаги соскабливаются ножом.

Имея смоляную палочку, необходимо еще обзавестись куском шерстяной ткани или меха. Слегка потерев смоляную палочку шерстяной тканью или волосами меха, мы наэлектризуем эту палочку, что обнаруживается весьма просто притяжением маленьких кусочков бумаги, кусочков пробки, соломинок и т. п. при поднесении к ним предварительно натертой палочки.

При производстве опытов такого рода полезно изготовить небольшой шарик из обычной пробки или из высушенной бузиновой сердцевины и подвесить его на тонкой нити. Лучше всего взять тонкую шелковинку. Верхний конец нити прикрепляют к некоторой стойке, которую можно просто устроить, например, следующим образом. Берут какую-либо бутылку *C* (фиг. 1) с пробкой, на которую накладывают слой сургуча или смолы, служившей для изготовления смоляной палочки. Затем сургучом или смолой же к этому слою сверху прикрепляют, как показано на фиг. 1, тонкую деревянную палочку *D* и на конце ее смолой приклеивают нить, на которой висит шарик *A*. Если теперь поднести сбоку к шарiku наэлектри-



Фиг. 3. Отталкивание шарика, наэлектризованного прикосновением к предварительно натертой смоляной палочке, от этой же палочки.

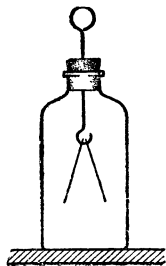


Фиг. 4. Взаимное отталкивание двух шариков, наэлектризованных от одной и той же палочки.

зованную смоляную палочку, то он притянется к палочке, и нить подвеса отклонится в сторону, как показано на фиг. 2.

Оказывается, однако, что если шарик прикоснется к наэлектризованной смоляной палочке (в нескольких точках ее поверхности), то сам шарик электризуется, т. е. на него переходит часть «смоляного» электричества, и после этого он уже будет отталкиваться от палочки, как показано на фиг. 3. Из этого мы заключаем, что «смоляное» электричество отталкивается от такого же «смоляного» электричества. Описываемый опыт с отталкиванием делается более наглядным, если иметь не один, а два одинаковых прибора с шариком. Мы можем порознь наэлектризовать оба шарика от одной и той же смоляной палочки и, располагая их затем один около другого, заметим, что они отталкиваются (фиг. 4).

Еще удобнее наблюдать подобное отталкивание на специальном приборе, называемом электроскопом¹ и служащем для обнаружения электризации, т. е. электрического состояния какого-либо тела. Простейшим образом можно изготовить электроскоп, как показано на фиг. 5. Вместо шариков, подвешенных на нитях, здесь взяты две узенькие полоски из тонкой бумаги. Проделав достаточно большие отверстия на концах бумажных полосок, свободно вешают их внутри бутылки на крючок, образованный из нижней части металлической проволоки. Эта проволока проходит через втулку, которая должна быть изготовлена из сургуча или смолы. Верхний конец проволоки можно согнуть в виде кольца. Если привести наэлектризованную смоляную палоч-



Фиг. 5. Электроскоп

¹ Греческое слово «скоπεο» значит «вижу».

ку в соприкосновение с металлическим кольцом электроскопа и при этом еще подвигать палочку так, чтобы передать кольцу электричество с разных участков поверхности палочки, то это электричество, как показывает опыт, по проволочке распространяется вниз до крючка, переходя далее и на бумажные листочки, причем мы увидим, что одинаково наэлектризованные листочки отталкиваются друг от друга и расходятся. Это изображено на фиг. 5. Таким образом расхождение листочков электроскопа явно обнаруживает их электризацию. Листочки опадут и вновь сблизятся, когда мы коснемся рукой верхнего конца проволочки. Это происходит потому, что электричество, заряджавшее части электроскопа, через человеческое тело куда-то уходит (уходит в землю).

Электроскоп является одним из главных приборов, применяемых при производстве основных опытов по электричеству. Он не только обнаруживает электризацию, но может также служить для приблизительной оценки степени электризации. Слабое расхождение листочков электроскопа свидетельствует о сравнительно слабой электризации. При сильной же электризации листочки электроскопа расходятся до предела, определяемого устройством прибора. Полезно поэтому брать для электроскопа стеклянный сосуд таких размеров, чтобы при наибольшем возможном расхождении листочков они еще не касались стенок сосуда.

15. ДВА РОДА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Подробное обследование разных случаев электризации показывает, что кроме смол есть еще много других веществ, которые электризуются при натирании их. Между прочим хорошо электризуется стекло. Если вместо смоляной взять стеклянную палочку, например, кусок стеклянной трубки, то с ней можно повторить опыты притяжения и отталкивания, показанные на фиг. 2—5. Для успеха опытов со стеклянной трубкой необходимо предварительно освободить ее поверхность от следов влажности, для чего полезно хорошо прогреть стеклянную палочку на солнце или в струе сухого горячего воздуха. Для натирания стеклянной палочки обычно употребляют сухую мягкую кожу. Можно воспользоваться обратной стороной меха, служившего для натирания смоляной палочки.

Листочки электроскопа будут совершенно одинаково расходиться независимо от того, заряжаются ли они от смоляной или от стеклянной палочки. Во всех описанных опытах мы не заметим какой-либо разницы между электризацией от смоляной и от стеклянной палочки, или, как говорили встарину, между «смоляным» и «стеклянным» электричеством.

Однако, разнообразя опыты с этими двумя видами электричества, мы убеждаемся в том, что они не вполне тождественны. Дело в том, что если мы зарядим порознь два шарика (подвешенных так, как это показано на фиг. 4), один — от смоляной палочки, а другой — от стеклянной, то при сближении их увидим, что они будут взаимно притягиваться; но они отталкиваются, будучи заряжены оба от одной и той же палочки, смоляной или стеклянной. Самые тщательные опыты показывают, что, каким бы способом мы ни возбуждали электризацию, всегда электричество получается либо одинаковое с электричеством от смоляной палочки, либо одинаковое с электричеством от стеклянной палочки. Существуют только два рода электричества: «смоляное» и «стеклянное».

В высокой степени замечательно, что указанные два рода электричества способны как бы уничтожать друг друга, или, точнее, взаимно уравниваться, когда они оказываются совмещенными на одном и том же теле. Это легко обнаруживается при помощи электроскопа. Если, например, мы начнем заряжать его от смоляной палочки, то листочки будут расходиться все больше и больше, по мере того как мы будем сообщать им добавочную электризацию от различных частей повторно натираемой той же смоляной палочки. Если же, однако, начав заряжать электроскоп от смоляной палочки и получив некоторое расхождение листочков, станем далее заряжать его от стеклянной палочки, то расхождение листочков будет последовательно делаться все меньше и меньше, так что в конце концов можно добиться полного сближения листочков, т. е. совершенно лишить их первоначальной электризации. Описанный опыт можно повторить и в обратном направлении, начав заряжать электроскоп от стеклянной палочки и затем сообщая ему электризацию от смоляной палочки.

Итак, «смоляное» и «стеклянное» электричества, взятые порознь, кажутся нам совершенно одинаковыми по своим общим проявлениям; взятые же вместе они уравнивают друг друга, или, как говорят, н е й т р а л и з у ю т ¹ друг друга. Взятые вместе они явно обнаруживают какие-то противоположные свойства. Ввиду этого принято различать два рода электричества, называя одно из них п о л о ж и т е л ь н ы м, а другое — о т р и ц а т е л ь н ы м и обозначая их противоположными знаками «плюс» и «минус», т. е. знаками $+$ и $-$. Совершенно произвольно условились считать «смоляное» электричество отрицательным, а «стеклянное» — положитель-

¹ Латинское слово «неуэтрáлис» обозначает «средний», «ни к тому ни к другому не принадлежащий».

ным. В дальнейшем мы будем пользоваться именно этими обозначениями двух родов электричества, общепринятыми в настоящее время. В связи с указанным мы можем называть положительное и отрицательное электричества — электричествами противоположных знаков, или просто противоположными электричествами. Так как знаки $+$ и $-$ иногда называются обратными знаками, то и обозначаемые этими знаками электричества, т. е. положительное и отрицательное, также называют электричествами обратных знаков.

Из рассмотрения взаимных действий тел, как угодно заряженных электричеством, мы можем, следовательно, вывести заключение, что положительное и положительное электричества отталкиваются одно от другого совершенно подобно тому, как взаимно отталкиваются отрицательное и отрицательное электричества; но положительное электричество притягивается к отрицательному электричеству, и, наоборот, отрицательное электричество притягивается к положительному. Другими словами, *одноименные электричества взаимно отталкиваются, а разноименные электричества взаимно притягиваются.*

Обычно принято называть электрическим зарядом или просто зарядом то электричество, которое находится на данном теле. Таким образом, касаясь действия электрических зарядов друг на друга, мы можем говорить: *одноименные заряды взаимно отталкиваются, а разноименные заряды взаимно притягиваются.*

16. ИЗОЛЯТОРЫ И ПРОВОДНИКИ

Изучая различные тела с точки зрения их отношения к электрическим зарядам, которые им сообщаются, можно установить две группы тел, довольно резко отличающихся одна от другой. Разного рода смолы, стекло, воск, парафин, резина, сера, слюда, горный хрусталь, фарфор, шелк и многие другие вещества отличаются той особенностью, что электрический заряд, сообщенный некоторой части поверхности подобных тел, сохраняется более или менее продолжительное время на этом именно месте, никуда не переходя. Поэтому данные тела называются обычно *и з о л я т о р а м и*¹. Совершенно иначе ведут себя металлы, графит, уголь. Если, например, сообщить электрический заряд какой-либо части поверхности металлического тела, то этот заряд чрезвычайно быстро распространяется по всей поверхности данного тела. Поэтому

¹ От латинского слова «инсула», что значит «остров», «уединенное место».

металлы, графит, уголь и некоторые другие подобные вещества называются проводниками электричества или просто проводниками. В противоположность им изоляторы иногда называются непроводниками.

Когда мы выше, в § 14, описывали устройство простейшего электроскопа (фиг. 5), мы отмечали, что проволоку, к которой подвешены листочки, необходимо пропустить через втулку, сделанную из смолы. В данном случае смола применяется для того, чтобы возможно совершеннее уединить, или, как говорят, изолировать, металлическую проволоку и не позволить электрическому заряду, сообщаемому проволоке, уйти куда-либо в сторону. Конечно, стеклянный сосуд сам по себе является, вообще говоря, изолятором, но только его изолирующие свойства сильно ухудшаются при малейших следах влажности на поверхности стекла, чего избежать довольно трудно. Втулка из смолы позволяет сделать более совершенной изоляцию проволоки электроскопа, независимо от состояния поверхности стекла. С той же целью при описании устройства простейших приборов, изображенных на фиг. 1—4, мы советовали деревянную палочку, поддерживающую нить с шариком, прикрепить на пробке бутылки через посредство слоя смолы. Пробка, дерево и бумага при обычном состоянии влажности являются до некоторой степени проводниками. Поэтому бумажные листочки электроскопа (фиг. 5) легко заряжаются электричеством, переходящим на них с поддерживающей их проволоки, которая очень хорошо проводит электричество, получаемое через проволочное кольцо от смоланой или стеклянной палочки.

На первый взгляд может показаться, что если мы наэлектризуем некоторый изолированный проводник, то соответствующий электрический заряд может более или менее равномерно распределиться внутри всего этого проводника. Необходимо, однако, принять во внимание, что одноименные заряды отталкиваются. Это правило должно относиться и к частям одного и того же заряда. Следовательно, отдельные части электрического заряда данного проводника будут взаимно отталкиваться и, вытесняя одна другую из внутренней области проводника, расположатся в конце концов только на его поверхности.

Выше мы привели примеры твердых изоляторов и проводников. К числу жидких изоляторов принадлежат, например, не содержащие влаги нефтяные масла, благодаря чему они нередко применяются в электротехнике¹ для изоляции. Обычная вода, водные растворы различных солей и

¹ Так называется область практических применений электрической энергии.

кислот, а также расплавленные металлы являются примерами жидких проводников.

Воздух и другие газы в обычных условиях оказываются хорошими изоляторами. Однако, существует ряд специальных условий, при которых газы становятся проводниками электричества. Об этом будем особо говорить в дальнейшем, в § 44. Во всяком случае газы, делаясь проводниками электричества, значительно уступают в этом отношении перечисленным выше твердым и жидким проводникам.

17. ЗАКОН КУЛОНА

Описанный в § 15 опыт с последовательно возрастающим расхождением листочков электроскопа совершенно ясно показывает, что степень этого расхождения непосредственно зависит от величины электрических зарядов, сообщенных листочкам. Чем больше мы электризуем листочки, тем больше будет их расхождение.

Величину электрического заряда некоторого тела обычно называют количеством электричества, сообщенного данному телу. Кулон¹ тщательно обследовавший различные действия заряженных тел друг на друга, установил, что сила взаимодействия двух таких тел (притяжение или отталкивание) при данном строго определенном расстоянии между ними делается во столько раз больше, во сколько раз увеличивается количество электричества, сообщенного любому из взаимодействующих тел. Так, если количество электричества на одном из заряженных тел увеличивается в два раза, а на втором остается неизменным, сила притяжения или отталкивания также увеличивается в два раза. Но если затем и заряд второго тела изменился, например, увеличился в три раза, то от этого произойдет добавочное увеличение силы взаимодействия еще в три раза и в результате эта сила окажется в шесть раз больше, чем было до увеличения зарядов одного и другого тела.

Что касается того, как изменяется сила притяжения или отталкивания в зависимости от расстояния между двумя взаимодействующими наэлектризованными телами, то Кулон показал, что в случае неизменности электрических зарядов обоих тел сила их взаимодействия увеличивается при уменьшении расстояния между ними значительно быстрее, чем происходит уменьшение этого расстояния. Если, например, расстояние, между двумя одноименно заряженными телами уменьшится в два раза, то сила их отталкивания друг от

¹ Французский физик Кулон (1736—1806) известен своими многочисленными исследованиями в области электрических и магнитных явлений.

друга увеличится в 2×2 , т. е. в 4 раза. При уменьшении расстояния в 10 раз, сила отталкивания увеличивается в 10×10 , т. е. в 100 раз, и т. д. В случае разноименно наэлектризованных тел в таком же отношении увеличивается сила их взаимного притяжения. При увеличении же расстояния между электрическими зарядами сила их взаимодействия быстро уменьшается по тому же закону, именно — при увеличении расстояния в 10 раз сила взаимодействия становится меньше в 10×10 , т. е. в 100 раз, и т. д.

Указанная зависимость, позволяющая вычислять силу взаимодействия двух наэлектризованных тел при том условии, что мы знаем количества электричества на том и другом теле, а также расстояние между ними, обычно называется **законом Кулона**. Пользуясь этим законом мы можем производить ряд других вычислений. Например, зная силу взаимодействия между двумя наэлектризованными телами, расстояние между ними и количество электричества на одном из них, мы можем определить количество электричества на другом теле. Точно так же, зная силу взаимодействия одинаковых зарядов, сообщенных двум телам, и расстояние между ними, мы можем определить количество электричества, заряжающее каждое из данных тел. Одним словом, закон Кулона позволяет применять математический язык при описании взаимодействий между наэлектризованными телами. Основная единица, служащая для измерения количества электричества, впервые была установлена в науке, исходя именно из закона Кулона. Эта единица количества электричества, конечно, совершенно условна и зависит от того, в каких единицах мы договорились выражать силу взаимодействия между наэлектризованными телами и расстояние между ними. *В науке принято считать за единицу количества электричества такой электрический заряд, который отталкивается в «пустоте» от другого такого же заряда, отстоящего на один сантиметр, с силой, равной одной дине.* Так как для ряда практических целей эта единица количества электричества оказывается слишком малой, то в электротехнике часто пользуются единицей, которая во много миллионов раз больше, и называют ее **кулон**ом (см. § 39, гл. 4).

18. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ. РАЗНОСТЬ ПОТЕНЦИАЛОВ, НАПРЯЖЕНИЕ

Из всего сказанного с достаточной ясностью вытекает, что электрическое состояние какого-либо заряженного тела зависит от количества электричества, находящегося на данном теле. Однако, это электрическое состояние тела зависит еще и от других обстоятельств. Между прочим оно в сильной

степени зависит еще от формы и размеров тела. Действительно, одно и то же количество электричества, будучи распределено на теле больших размеров и на теле малых размеров, будет проявлять в некотором отношении неодинаковые свойства. На большом теле вследствие значительных расстояний между отдельными частями его электрического заряда, взаимное отталкивание этих частей, а также стремление заряда уйти куда-нибудь с этого тела и распространиться на другие тела будут меньше по сравнению с тем, что наблюдается при сообщении того же электрического заряда телу малых размеров. Небольшое расстояние между отдельными частями заряда вызывает более сильное отталкивание их одной от другой, что имеет следствием более сильное стремление электричества уйти с данного малого тела. Если мы имеем дело с проводящими телами и зарядим сначала большое тело, а затем, сообщив такое же количество электричества малому телу, соединим эти два тела тонкой металлической проволокой, то по причине вышеуказанной разницы в электрическом состоянии двух рассматриваемых тел некоторая часть заряда малого тела перейдет на большое тело.

Следовательно, при описании электрических явлений оказывается необходимым знать не только количество электричества, расположенного на том или ином теле, но и то особое электрическое состояние каждого из этих тел, которое выражается в большем или меньшем стремлении электрических зарядов покинуть соответствующие тела. Это особое электрическое состояние некоторого тела принято называть **электрическим потенциалом** или сокращенно просто **потенциалом**¹.

Внимательное рассмотрение вопроса об электрическом потенциале некоторого тела показывает, что он должен зависеть не только от заряда данного тела, но также и от зарядов всех других окружающих тел, так как согласно закону Кулона все заряды вообще должны взаимодействовать с электричеством, расположенным на рассматриваемом теле, и своим притяжением или отталкиванием должны способствовать или противодействовать возможному переходу электричества с этого тела на другие тела. Таким образом электрический потенциал некоторого тела находится в полной зависимости от всех без исключения электрических зарядов, так или иначе распределенных в данной группе тел.

Итак, мы можем сказать, что при соединении металлической проволокой двух проводящих тел (заряженных положи-

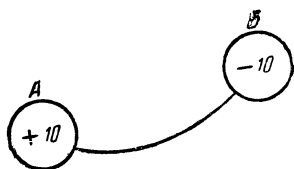
¹ От латинского слова «потэнция», что значить «власть», «возможность». В данном случае необходимо подразумевать напряженность стремления электричества уйти с данного тела.

тельным, например, электричеством) с поверхности тела, потенциал которого больше, некоторое количество электричества перейдет на тело, обладающее меньшим потенциалом. Собственно говоря, при описании условий такого перехода электричества с одного тела на другое важно знать не столько полную величину электрического потенциала, которым обладает каждое из этих тел, сколько величину разности потенциалов между ними, или, как еще принято говорить, напряжение между двумя телами. Если эта разность потенциалов будет очень мала, то сравнительно небольшое количество электричества перейдет от тела, обладающего более высоким потенциалом, к телу с более низким потенциалом. Если же разность потенциалов будет велика, то перейдет соответственно большее количество электричества. Во время перехода электричества с одного тела на другое электрические потенциалы обоих тел уравниваются и в конце концов разность их потенциалов делается равной нулю. В связи со сказанным можно утверждать, что все части некоего наэлектризованного проводящего тела, находящегося в равновесном состоянии, должны обладать одинаковым электрическим потенциалом. Другими словами, разность потенциалов между любыми двумя частями такого наэлектризованного тела должна быть равна нулю.

Условно считают, что электрический потенциал земли равен нулю. В таком случае электрический потенциал какого-либо тела есть в то же время разность потенциалов между этим телом и землей или, короче, напряжение между данным телом и землей.

В полном соответствии с тем, что электричество бывает двух родов — положительное и отрицательное, и *электрический потенциал называется положительным или отрицательным* в зависимости от того, какого знака электричество стремится удалиться с тела, имеющего данный потенциал, на тело, потенциал которого равен нулю. Как было указано выше, электрический потенциал земли мы условно считаем равным нулю. По одну сторону от данного нуля потенциалы мы считаем положительными, по другую сторону — отрицательными. В этом отношении мы ведем счет с внешней стороны совершенно подобно тому, что принято делать при отсчете температуры по столбчатому термометру, на шкале которого также существует условный нуль, соответствующий, как известно, температуре таяния льда. Мы говорим о температуре выше нуля (тепло) и о температуре ниже нуля (холод). Температуру выше нуля называем положительной, температуру ниже нуля — отрицательной.

Противоположность свойств положительного и отрицательного электричества проявляется при всяком перемещении



Фиг. 6. Опыт с уравниванием электрических состояний двух тел, предварительно заряженных одинаковыми количествами электричества противоположных знаков и затем соединенных металлической проволокой.

электричества в том, что положительное электричество стремится переходить от мест с более высоким потенциалом к местам с более низким потенциалом, т. е. от большего положительного потенциала к меньшему положительному потенциалу или вообще в сторону отрицательного потенциала, отрицательное же электричество стремится двигаться в обратном направлении, т. е. от большего отрицательного потенциала к меньшему отрицательному потенциалу или вообще в сторону положительного потенциала. В отношении всех внешних проявлений передвижение положительного электричества в некотором направлении совершенно тождественно с передвижением отрицательного электричества в противоположном направлении. Очень часто бывает даже так, что мы не знаем в точности, какого именно знака электричество (+ или —) имеет возможность перемещаться. В таком случае, не рискуя впасть в ошибку в смысле внешних проявлений этого перемещения, мы можем рассуждать так, как будто бы перемещается только положительное электричество. От этого результат несколько не изменяется.

С целью пояснения только что сказанного рассмотрим следующий случай. Допустим, что на некотором проводящем теле *A* находится 10 единиц положительного электричества, а на таком же теле *B* находится 10 единиц отрицательного электричества (фиг. 6). При соединении этих двух тел металлической проволокой, как показано на фиг. 6, произойдет нейтрализация, т. е. уравнивание электрических потенциалов тел *A* и *B* вследствие перехода электричества с одного тела на другое. Мы можем не знать, какого именно знака электричество и в каком количестве перейдет за это время с одного тела на другое. Может быть, например, с тела *A* на тело *B* перейдут 3 единицы положительного электричества, а с тела *B* на тело *A* перейдут 7 единиц отрицательного электричества. В таком случае, на теле *A* останется 7 единиц положительного электричества, которые будут уравновешены пришедшими с тела *B* семью единицами отрицательного электричества. На теле же *B* останутся 3 единицы отрицательного электричества, и они будут уравновешены пришедшими с тела *A* тремя единицами положительного электричества. Благодаря описанному обмену частями электрических зарядов тела *A* и *B* разрядятся, т. е. придут в первоначальное состояние, бывшее до их электризации, и разность потенциалов

между ними делается равной нулю. Однако, совершенно такой же результат получился бы, если бы мы просто переместили весь заряд тела *A*, равный 10 единицам положительного электричества, на тело *B*, где противоположные заряды полностью нейтрализуют друг друга.

Итак, в дальнейшем, говоря о передвижении электричества, мы нередко, ради упрощения описания этого явления, можем предполагать, что переносится только положительное электричество. При этом всегда будем помнить, что положительное электричество само по себе стремится переходить вообще от мест с более высоким потенциалом к местам с более низким потенциалом и в частности от мест с положительным потенциалом к местам с отрицательным потенциалом.

19. ЕДИНИЦА ПОТЕНЦИАЛА И РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ. ВОЛЬТ

Ввиду того что электрическая разность потенциалов (напряжение) имеет весьма существенное значение при описании разного рода электрических явлений, а при практическом использовании электрической энергии необходимо уметь просто выражать величину разности потенциалов, международным соглашением установлена единица для измерения разности потенциалов или напряжения, и ей дано название **вольт** по имени итальянского ученого Вольты¹.

Само собой разумеется, что вольт, являясь единицей разности потенциалов, может служить и вообще для измерения электрического потенциала, считаемого от некоторого условного нуля. Как мы указывали выше электрический потенциал земли принято считать равным нулю. По отношению к земле, следовательно, мы и можем выражать в вольтах величину потенциала того или иного заряженного тела. Так, например, мы можем говорить, что электрический потенциал некоторого тела равен $+100$ вольтам (по одну сторону от нуля), а потенциал какого-либо другого тела равен -20 вольтам (по другую сторону от нуля). В таком случае, разность потенциалов между этими телами, т. е. напряжением между ними, имеет величину в 120 вольт. Если в каком-либо другом случае потенциал одного тела равен $+1\,000$ вольтам, а другого тела $+880$ вольтам, то напряжение между ними опять же будет равно 120 вольтам и т. п.

В современной электротехнической практике нередко при-

¹ Александр Вольта (1745—1827) был профессором университета в итальянском городе Павии. Помимо своего великого изобретения—электрической батареи (первого источника электрического тока) он известен многими исследованиями, всесторонне выяснившими ряд важных обстоятельств в области электрических явлений вообще.

меняются высокие напряжения, измеряемые многими тысячами вольт. Поэтому весьма часто для обозначения тысячи к слову вольт добавляется всем хорошо известная приставка кило¹.

Таким образом 1 киловольт = 1 000 вольтам.

При передаче электрической энергии на далекие расстояния теперь применяются напряжения, измеряемые сотнями киловольт.

В случаях очень малых напряжений (разностей потенциалов) их обычно выражают в тысячных долях вольта, называемых милливольтами², и в миллионных долях вольта, называемых микровольтами³.

20. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ВОЛЬТМЕТР

Измерительные приборы, служащие для определения разности потенциалов (напряжения) между двумя какими-либо телами, называются вольтметрами³. Существует много различных способов устройства вольтметров. Между прочим в качестве вольтметра может служить описанный выше электроскоп (фиг. 5), если только его снабдить каким-либо приспособлением для определения степени расхождения листочков, например, если его снабдить так называемой шкалой делениями, расположенной близ нижних концов листочков таким образом, чтобы можно было отсчитывать, на сколько делений шкалы листочки электроскопа разошлись. Подобный простейший вольтметр будет измерять разность потенциалов между листочками электроскопа и землей, или, другими словами, электрический потенциал листочков по отношению к земле, потенциал которой считаем равным нулю. Дело в том, что степень расхождения листочков должна зависеть от величины зарядов, им сообщенных, а каждой величине этих зарядов будет соответствовать совершенно определенный потенциал листочков и той проволоки, на которой они подвешены. Ясно, конечно, что число вольт, соответствующих различным делениям шкалы, служащей для наблюдения степени расхождения листочков, должно быть предварительно определено, для чего существуют различные способы. При более точных измерениях, во избежание неопределенных влияний на степень расхождения листочков со

¹ Слово «кило» — греческого происхождения и обозначает «тысяча».

² Латинское слово «милле», обозначающее «тысяча», применяется для образования приставки «милли», служащей для указания на то, что речь идет о тысячной доле какой-либо единицы.

³ Греческое слово «микрос» значит «малый, «очень малый». Приставка «микро» принята вообще для обозначения миллионной доли какой-либо единицы.

⁴ По-гречески «метрón» значит «мера».

стороны электричества, могущего случайно оказаться на стенках стеклянного сосуда или на близко расположенных других телах, заменяют стеклянный сосуд металлической коробкой, снабженной надлежащим отверстием в боковой стенке или прорезом для того, чтобы можно было видеть листочки и расположенную рядом с ними шкалу с делениями. Во время измерений металлическую коробку присоединяют проволокой к земле, что обычно осуществляется путем соединения другого конца этой проволоки хотя бы с водопроводной трубой. Таким образом потенциал металлической коробки всегда поддерживается равным нулю и создаются вполне определенные условия для измерения потенциала листочков.

Если при помощи непроводящих подставок, например, из сургуча или смолы, хорошо изолировать металлическую коробку описываемого электроскопа-вольтметра, то при помощи его можно мерить разность потенциалов между какими-либо двумя наэлектризованными телами. С этой целью тонкой проволочкой присоединяют к одному из этих тел верхнее металлическое кольцо и, следовательно, листочки, а к другому телу — металлическую коробку электроскопа. Тогда расхождение листочков будет строго соответствовать разности потенциалов, т. е. напряжению между данными двумя телами.

Вольтметры, основанные на использовании электрических отталкиваний и притяжений, принято вообще называть *электростатическими*.

В настоящее время разнообразные электростатические вольтметры изготовляются фабричным путем, и устройство их достигло большой степени совершенства.

21. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ЧЕРЕЗ ВЛИЯНИЕ

Кроме электризации трением и через непосредственное соприкосновение с другим наэлектризованным телом существует еще много иных способов приводить некоторое тело в наэлектризованное состояние. Представляет большой интерес и имеет большое практическое значение так называемая *электризация через влияние*, обнаруживающаяся на любом проводящем теле всякий раз, когда оно приближено к другому ранее как-либо наэлектризованному телу или расположено около него, будучи при этом сколь угодно хорошо изолировано от него.

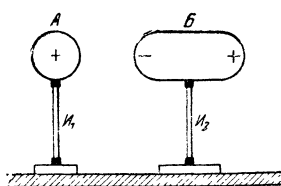
Легче всего объяснить описываемое явление, если принять во внимание, что в состав каждого тела, как установлено современной наукой, всегда входит (см. § 25) очень большое количество электричества, но только мы обычно этого не замечаем, так как всякое тело, кажущееся нам ненаэлектризованным, содержит в себе совершенно одинаковое количество

и положительного и отрицательного электричества. Оба эти электричества в таком случае полностью нейтрализуют, т. е. уравнивают, друг друга в отношении всех внешних действий. Однако, если положительное электричество будет в избытке, данное тело покажется нам заряженным положительно. Наоборот, при избытке отрицательного электричества мы называем тело заряженным отрицательно. Ясно, конечно, что избыток электричества одного знака может произойти вследствие убыли электричества другого знака. Всегда мы должны помнить, что каждое называемое нами незаряженным тело по природе своей уже обладает большим запасом электричества обоих знаков в одинаковых количествах.

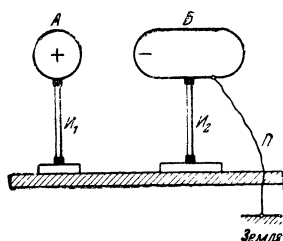
На основании сказанного нетрудно понять следующее. Представим себе некоторое заряженное, например, положительным электричеством (знак $+$) тело A , поддерживаемое какой-либо изолирующей стойкой I_1 , как показано на фиг. 7. Поднесем к телу A какое-либо незаряженное проводящее тело B , также укрепленное на изолирующей стойке I_2 . Вследствие влияния со стороны положительного заряда A притягиваемое им отрицательное электричество тела B сместится в этом теле по направлению к телу A и в то же время положительное электричество тела B , отталкиваемое зарядом A , сместится по направлению от тела A . Вместе с тем, конечно, положительное и отрицательное электричества тела B не перестают притягиваться одно к другому. Таким образом в зависимости от степени влияния со стороны положительного заряда A происходит большее или меньшее частичное разделение двух родов электричества, которыми обладает тело B , причем со стороны заряда A на поверхности тела B расположится избыточное отрицательное электричество (на фиг. 7 знак $-$), а со стороны, противоположной заряду A , на поверхности тела B появится избыточное положительное электричество (знак $+$ на фиг. 7, тело B).

Положительное электричество, появившееся в этом случае на поверхности тела B под влиянием заряда A , называется свободным электричеством, так как оно свободно может быть отведено в землю путем соединения проводящего тела B с землей при помощи какой-либо металлической проволоки Π (фиг. 8), где угодно касающейся поверхности тела B , или просто путем прикосновения руки к телу B . Это происходит потому, что свободное электричество тела B отталкивается зарядом A . В то же время отрицательное электричество тела B , притягиваемое зарядом A , не уходит в землю и остается на поверхности тела B . Оно называется поэтому связанным электричеством.

Описанные выше явления происходят совершенно независимо от знака электрического заряда A . На фиг. 7 и 8 этот



Фиг. 7. Основной опыт с электризацией через влияние.



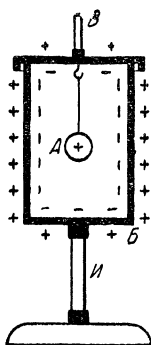
Фиг. 8. Электризация через влияние. Свободное электричество отведено в землю.

заряд в виде примера изображен как положительный. В случае отрицательного заряда на теле A наведенные электричества на проводящем теле B будут: со стороны заряда A — положительное (связанное) и с противоположной стороны — отрицательное (свободное). Вообще можно высказать следующее положение.

При электризации через влияние, происходящей от некоторого заряда A , на проводящем теле B наводится электричество обоих знаков, причем со стороны, обращенной к заряду A , наводится электричество обратного знака и оно является связанным, а на противоположной стороне тела B наводится свободное электричество того же знака, что и заряд A .

Явление электризации через влияние наблюдается весьма часто. С ним приходится иметь дело всегда, когда в данной группе тел некоторым из них сообщаются электрические заряды того или иного знака. То притяжение наэлектризованным телом легких лоскутков бумаги, соломинок и т. п., о котором мы говорили в самом начале настоящей гл. 2, в § 13, является результатом именно электризации через влияние. Действительно, на лоскутке бумаги под влиянием наэлектризованного тела наводятся связанное и свободное электричества. Связанное электричество, по знаку противоположное заряду наэлектризованного тела, будучи при этом расположено ближе к данному телу, притягивается к нему с силой, которая больше отталкивания одноименного свободного электричества, дальше расположенного. Поэтому притяжение берет верх над отталкиванием, и лоскуток бумаги стремится двигаться по направлению к заряженному телу.

Возвращаясь вновь к основному опыту, представленному на фиг. 7, необходимо отметить, что количество связанного электричества, наводимого на теле B , по величине в точности равно количеству свободного электричества противоположного знака, наводимому на том же теле B . Это следует,



Фиг 9 Электризация через влияние. Закрытая металлическая коробка с находящимся внутри заряженным телом.

во-первых, из того, что появление связанного и свободного электричеств приходит вследствие частичного разделения двух электричеств (+ и —), которые уже существовали в теле Б в совершенно одинаковых количествах. Во-вторых, это же доказывается непосредственным наблюдением. Именно, если после наведения на теле Б двух электрических зарядов обоих знаков, как показано на фиг. 7, удалить тело А вместе с его зарядом или просто разрядить тело А прикосновением руки, то тело Б само собой возвращается в первоначальное нейтральное состояние, т. е. бывшие на нем противоположные электричества полностью уравновешивают друг друга. Следовательно, на теле Б были наведены одинаковые количества противоположных электричеств.

Полезно иметь в виду еще одно весьма существенное обстоятельство, состоящее в том, что количество наведенного на теле Б электричества того или иного знака ни при каких условиях не бывает больше количества электричества на теле А, а обычно бывает меньше. Опыт показывает, что количество наведенного электричества, например связанного, будет тем больше, чем полнее тело Б окружает заряд А. В предельном крайнем случае, если проводящее тело Б со всех сторон окружает заряд А, как это представлено, например, на фиг. 9, количество связанного электричества, наведенного на внутренней поверхности тела Б, в точности равно количеству противоположного по знаку электричества на теле А. На фиг. 9 Б есть некоторая металлическая коробка, с металлической же крышкой, к которой подвешено тело А на шелковой или хорошо проваренной в смоле обыкновенной нити. Коробка Б укрепляется на изолирующей стойке И или просто ставится на кусок смолы. Для зарядения тела А при производстве опыта крышка может быть поднята при помощи изолирующей рукоятки В вместе с висящим на ней телом А. Затем крышка ставится на место. Наведенное на внешней поверхности металлической коробки свободное электричество, которое на фиг. 9 показано как положительное, может быть отведено в землю прикосновением руки. Тогда коробка Б по внешности будет казаться совершенно не имеющей каких-либо электрических зарядов. Но внутри нее останутся заряд А и противоположный ему по знаку заряд связанного электричества на внутренней поверхности коробки Б. Для доказательства того, что эти заряды одинаковы по своей величине, можно наклонить коробку. При этом тело А коснется внут-

ренной поверхности коробки, и между ними произойдет обмен электричеств, как это было объяснено в конце § 18 применительно к фиг. 6. В конце концов разные и противоположные заряды полностью нейтрализуют друг друга. Если после этого поднять крышку с телом *А*, то оно окажется уже неэлектризованным. Точно так же окажется неэлектризованной и металлическая коробка. Никакие самые чувствительные электроскопы не обнаружат на них следов электризации.

22. ЭЛЕКТРОФОР

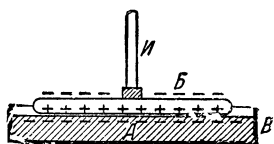
Представим себе, что мы следующим образом производим основной опыт с электризацией через влияние (фиг. 7). Допустим, что совершенно незаряженное проводящее тело *Б* сначала находилось где-либо вдали от заряженного тела *А*. Приблизим его затем к телу *А* и кратковременным прикосновением устраним наведенное свободное электричество. Наконец, удалим тело *Б*. При этом оставшееся на нем электричество, бывшее раньше связанным близ тела *А*, освободится от влияния притяжений со стороны заряда *А*, т. е. тоже станет свободным и способным перейти на некоторое третье тело, заряжая его. Многократно повторяя описанное приближение и удаление тела *Б* относительно неподвижного заряженного тела *А*, мы можем, следовательно, произвольно долго извлекать из тела *Б* электричество, которое образуется как связанное, а потом делается свободным. Основываясь на этом, можно придумать много различных устройств, позволяющих возбуждать, или, как говорят, генерировать¹ электричество в сколь угодно больших количествах. Примером подобного рода генератора электричества, т. е. устройства, порождающего электричество, является весьма простой прибор, называемый электрофором² и в общих чертах изображенный на фиг. 10.

Для изготовления электрофора берут круглую плоскую коробку *В*, сделанную, например, из жести, и заливают ее слоем смолы *А*. В качестве такой смолы может хорошо служить смесь из сапожного вара и канифоли, упомянутая выше, в § 14. После застывания слоя смолы поверхность ее может быть наэлектризована натираемием при помощи какого-либо меха или еще лучше ударами меха по поверхности. Для этой цели иногда применяют лисий хвост. Второй существенной частью электрофора служит круглая пластина *Б*, диаметром³, например, от 25 до 30 сантиметров, пригото-

¹ От латинского слова «гёнеро», что значит «произвожу», «создаю».

² Греческое слово «фброс» значит «несущий», «приносящий».

³ Слово «диаметр» обозначает «поперечник» и происходит от греческих слов «диá» — «поперек», «насквозь» и «метрóн» — «мера».



Фиг. 10. Электрофор.

ленная из какого-либо проводящего материала или хотя бы из дерева, но покрытая в этом случае тонким слоем металла (тонким оловянным листком или просто жестию). К пластинке *Б* прикрепляется ручка *И* из смолы или из стекла. Для получения электричества от электрофора сначала электризуют (отрицательно) поверхность смоляного слоя *А* ударами меха. Затем на эту поверхность накладывают проводящую пластину *Б*. В нескольких точках, по крайней мере в трех, она коснется поверхности смолы. Эти точки служат опорой для пластины *Б*. Но значительная часть поверхности пластины *Б* вследствие неровности обеих поверхностей будет отделена от наэлектризованной поверхности смоляного слоя *А* небольшим промежутком. В таком случае создаются условия для электризации проводящей пластины *Б* через влияние со стороны отрицательного электричества, расположенного на поверхности смоляного слоя. Именно на нижней поверхности пластины, обращенной к смолянному слою, наводится связанное положительное электричество, а на верхней поверхности пластины наводится свободное отрицательное электричество. Все это показано на фиг. 10 соответствующими знаками $+$ и $-$. Наведенное свободное электричество легко уводится с пластины *Б* прикосновением руки или при помощи особого приспособления, которое можно устроить, наложив, например, на край смоляного слоя небольшую соединенную с землей металлическую пластинку так, чтобы она прикасалась к пластине *Б* всякий раз, когда мы ее накладываем на смоляной слой. Приподнимая затем пластину *Б*, мы освобождаем значительную часть связанного положительного электричества от влияния притяжения со стороны отрицательного заряда смоляного слоя *А*, т. е. делаем положительное электричество свободным, благодаря удалению его от слоя *А*. Теперь мы получаем полную возможность перевести освобожденное положительное электричество с пластины *Б* на какое угодно тело, расположенное в стороне от электрофора. Потом мы можем опять наложить пластину *Б* на наэлектризованный смоляной слой *А*, отвести в землю свободное отрицательное электричество и снова, подняв пластину *Б*, передать положительное электричество на сторону и т. д., до тех пор, пока нам нужно получать от электрофора электричество для тех или иных целей.

Само собой разумеется, что вовсе необязательно получать от электрофора описанным путем только положительное электричество. При том устройстве электрофора, которое мы описали, можно всякий раз отводить на расположенное в сто-

роне тело свободное отрицательное электричество. Для этой же цели еще удобнее поступить следующим образом. Нижний, остающийся неизменно заряженным, смоляной слой *А* можно заменить металлической пластиной (обозначим ее той же буквой *А*) таких же поперечных размеров, изолировав эту металлическую пластину *А* соответствующими подставками и снабдив верхнюю поверхность ее тремя невысокими накладками из сургуча или смолы, назначение которых состоит в изолировании пластины *Б* от нижней металлической пластины *А*. Теперь мы можем предварительно зарядить нижнюю пластину *А*, по желанию, положительным или отрицательным электричеством и затем, опуская и поднимая пластину *Б*, получать от этого электрофора описанными способами отрицательное или положительное электричество в неограниченных количествах.

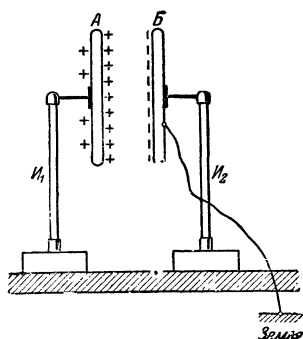
Давно уже были разработаны так называемые электрофорные электрические машины, в которых используется та же электризация через влияние, что и в простом электрофоре, но только попеременное движение пластины *Б* вниз и вверх заменено вращательным движением. Устройство электрофорных машин бывает весьма разнообразно и в основном сводится к следующему. Несколько плоских металлических накладок, служащих для той же цели, что и пластина *Б*, располагаются на круглой пластине из стекла или эбонита¹, могущей вращаться, как колесо, вокруг некоторой оси. При этом вращении металлические накладки по очереди проходят мимо одной или двух неподвижных металлических же частей, постоянно заряженных положительным или отрицательным электричеством. Таким образом металлические накладки то приближаются к неподвижным электрическим зарядам, то удаляются от них. Благодаря этому накладки электризуются через влияние совершенно подобно тому, как электризуется пластина *Б* в электрофоре (фиг. 10), и затем могут отдавать связанное электричество (после его освобождения) каким-либо другим проводящим телам, расположенным вне машины. Все необходимые для этого соединения совершаются при вращении сами собой посредством прикосновения движущихся металлических накладок к металлическим упругим полоскам, надлежащим образом расположенным и закрепленным неподвижно.

Техническое значение электрофорных машин до последнего времени было очень незначительно. Область их применения сграничивалась пока главным образом медициной.

¹ Эбонит, являющийся очень хорошим твердым изолирующим материалом, изготовляется в основном из резины, к которой добавляются некоторые примеси, в том числе сера, образующая при нагревании прочное соединение с резиной.

23. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР

Предположим, что две металлические пластины A и B укреплены на изолирующих стойках I_1 и I_2 и расположены одна против другой (фиг. 11). Допустим далее, что пластина B тонкой проволокой присоеди-



Фиг. 11. Электрический конденсатор.

нена к земле. Сначала пластину A удалим на большое расстояние от пластины B и там сообщим ей некоторое количество, например, положительного электричества. При этом пластина A приобретает какой-то электрический потенциал относительно земли, скажем 1 000 вольт.

Если теперь приблизить заряженную пластину A к пластине B , которая соединена с землей, то как мы знаем, на пластине B появится наведенное связанное электричество, в данном случае—отрицательное. Свободного положительного электричества на пластине B не обнаружится, так как оно будет уходить в землю по мере образования при приближении пластины A .

Как было указано выше, в § 18, величина электрического потенциала некоторого заряженного тела определяется тем, в какой степени его заряд стремится уйти с данного тела под влиянием взаимного отталкивания отдельных частей этого именно заряда, а также под влиянием воздействия со сторон зарядов, расположенных на окружающих телах.

Появление связанного отрицательного электричества на пластине B должно обратно связывать в большей или меньшей мере положительное электричество пластины A , в зависимости от расстояния между пластинами. Отрицательный заряд B будет притягивать к себе положительный заряд A , препятствуя ему удалиться с пластины A куда-либо в сторону. Следовательно, приближение пластины A к пластине B должно сопровождаться уменьшением потенциала пластины A . Опыт вполне подтверждает это заключение. Действительно, по мере сближения пластин A и B потенциал пластины A делается все меньше и меньше. Если он был равен вначале, например, 1 000 вольтам, то при достаточном сближении пластин он может уменьшиться хоть до 1 вольта и даже ниже.

Допустим, что мы хотим зарядить пластину A положительным электричеством и сообщить ей при этом как можно больший заряд от некоторого источника. Если пластина A

удалена от пластины *Б*, то этому наэлектризовыванию пластины *А* может скоро наступить предел, когда потенциал ее достаточно возрастет и будет препятствовать переходу новых количеств электричества на пластину *А*. Сближая пластины *А* и *Б* и тем самым понижая потенциал пластины *А*, скажем в 10 раз, мы получим возможность от того же источника накопить на пластине *А* в 10 раз большее количество электричества и т. д. Наличие близко расположенной пластины *Б* позволяет, таким образом, как бы сгущать электричество, сообщаемое пластине *А*. Вместе с тем, конечно, соответственно возрастает и, в свою очередь, сгущается также и противоположный заряд на пластине *Б*. По этой именно причине устройство, состоящее из двух сближенных и изолированных одна от другой пластин *А* и *Б*, называется конденсатором¹.

Итак, в конденсаторе мы можем накапливать значительные количества электричества противоположных знаков даже при сравнительно небольшой разности потенциалов между пластинами. Мы имеем полное право говорить в данном случае о разности потенциалов, а не о потенциале одной из пластин, как это мы делали сначала при рассмотрении электризации пластин *А* и *Б* (фиг. 11). Совершенно очевидно, что соединение пластины *Б* с землей не имеет особо существенного значения. Дело в том, что это соединение служило нам в описанном случае для отведения в землю положительного электричества. Однако, как это было разъяснено в конце § 18 (фиг. 6), вместо перехода в землю положительного электричества можно говорить о переходе от земли к пластине *Б* соответствующего количества отрицательного электричества. Результат будет один и тот же. Это отрицательное электричество может быть подано на пластину *Б* не только от земли, но также и от какого-либо источника отрицательного электричества. Короче говоря, суть дела не в том, чтобы пластина *Б* была соединена с землей, а в том, чтобы на пластине *Б* накапливалось отрицательное электричество в соответствии с положительным электричеством, накапливающимся на пластине *А*. Для этого неважно, будет ли потенциал пластины равен потенциалу земли, т. е. условному нулю, или нет. Запас электрических зарядов обоих знаков в данном конденсаторе полностью зависит только от величины разности потенциалов между его пластинами.

При суждении о способности того или иного конденсатора накапливать электричества противоположных знаков принято говорить о его емкости, или просто емкости. Емкость данного конденсатора, очевидно, будет тем

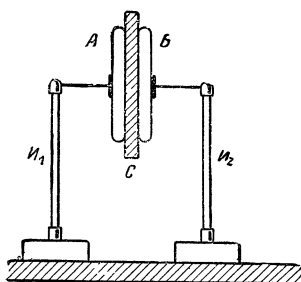
¹ От латинского слова «кондэнсо», что значит «сгущаю».

больше, чем большее количество электричества будет в нем накапливаться при некоторой определенной разности потенциалов, например, при 1 вольте. Практически принято считать величину емкости некоторого конденсатора численно равной количеству кулонов положительного или отрицательного электричества, накапливаемого в этом конденсаторе при разности потенциалов между его пластинами, равной 1 вольту. Таким образом мы выражаем емкость при помощи некоторой условной единицы емкости. Эту единицу емкости международным соглашением постановлено называть фарадой¹. Одна миллионная часть фарады называется микрофарадой.

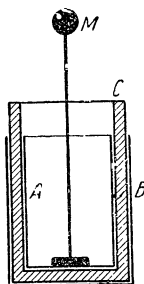
Рассматривая простейший конденсатор, изображенный на фиг. 11, мы предполагали, что между сближенными пластинами *A* и *B* находится слой воздуха, служащий, вообще говоря, хорошим изолятором между ними. Можно, однако, слой воздуха заменить каким-либо иным изолятором. Например, можно поместить между пластинами *A* и *B* стеклянную пластинку *C* (фиг. 12). Практически это даже весьма полезно во многих случаях, так как опыт показывает, что при замене воздушной прослойки стеклом электрическая емкость конденсатора, при том же расстоянии между пластинами, увеличивается в несколько раз (от 5 до 10 раз, в зависимости от сорта стекла).

Первый конденсатор был построен еще в 1746 г. в физической лаборатории университета города Лейдена (в Голландии). В этом конденсаторе в качестве изолятора между двумя проводящими частями его было взято стекло именно стенки и дно стеклянной банки. Такой формы конденсатор применяется нередко и в настоящее время. Он носит название лейденской банки. На фиг. 13 показано устройство лейденской банки. Стеклянная банка *C*, той или иной формы, снабжается изнутри и снаружи так называемыми обкладками *A* и *B*, которые чаще всего делаются из тонких металлических листов, обычно оловянных или алюминиевых, прикрепляемых к поверхности стекла каким-либо клеем. Верхние края обкладок не доходят до краев банки, благодаря чему получается довольно длинный путь перехода от одной обкладки к другой, считая по поверхности стекла. Это бывает

¹ Михаил Фарадей (1791—1867), сын лондонского кузнеца, первоначально работавший в качестве переплетчика, упорным трудом над собой и самообразованием достиг того, что был допущен в качестве простого работника в лабораторию Лондонского королевского института, где он вскоре выдвинулся благодаря ряду научных открытий и был назначен директором этого известного научно-исследовательского учреждения. Фарадей был величайшим физиком, обогатившим науку многими большими достижениями. Работы Фарадея явились основой развития современной электротехники.



Фиг. 12. Электрический конденсатор со стеклянной пластиной.



Фиг. 13. Лейденская банка.

необходимо в целях лучшей изоляции обкладок одной от другой, так как поверхность стекла при наличии малейших следов влажности немного проводит электричество. Для сообщения заряда внутренней обкладке *A* к ней на дне прикрепляется металлический стержень, заканчивающийся наверху обычно металлическим шариком *M*. Лейденскую банку можно хорошо зарядить, например, от электрофора, как-либо присоединив наружную обкладку *B* к земле и подавая электричество на внутреннюю обкладку *A* путем многократного прикосновения к шарiku *M* поднятой круглой пластиной электрофора.

Накопленные в лейденской банке электрические заряды могут быть далее использованы для различных целей. При той разности потенциалов, до которой удастся зарядить лейденскую банку от электрофора (тысячи и даже десятки тысяч вольт), можно, например, получить очень яркую электрическую искру. Для этого согнутую дугой проволоку приводят сначала одним концом в соприкосновение с наружной обкладкой *B*, а затем, сохраняя этот контакт¹, приближают верхний конец проволоочной дуги к шарiku *M*. Верхний конец проволоки и шарик являются в данном случае электродами², т. е. частями, подводящими электричество к некоторому месту. Когда расстояние между этими электродами станет сравнительно невелико (несколько миллиметров, например), между ними с треском проскакивает яркая искра вследствие пробивания воздуха, обычно хорошего изолятора, электричеством, напряженно стремящимся перейти с одной обкладки на другую. Подобного же рода

¹ Слово «контакт» происходит от латинского слова «контактус», что значит именно «соприкосновение». Часто слово «контакт» употребляется также в смысле места соприкосновения двух проводящих, обычно металлических, частей.

² По-гречески «одос» означает «путь».

электрические искры, но только очень больших размеров, мы наблюдаем и в природе в виде молний, через которые разряжаются на землю грозовые облака, заряженные электричеством до весьма высокого потенциала, измеряемого многими миллионами вольт. Электрический разряд в виде искры может произойти не только через слой воздуха, разделяющего электроды, но и сквозь пластину из изолирующего материала, например, из стекла. В описанном опыте с разрядом лейденской банки при достаточной величине разности потенциалов между ее обкладками искра легко пробивает помещенную между электродами стеклянную пластинку, более тонкую, чем стенки банки. Электрическая искра может пробить даже стенки или дно самой банки, если разность потенциалов между обкладками станет больше некоторой допустимой величины. Пробой изолятора в электротехнических устройствах представляет собой весьма вредное явление, так как он обычно сопровождается разрушением всякого рода изолирующих частей.

В современной электротехнике конденсаторы находят себе много применений. Разработано немало разных способов изготовления конденсаторов в зависимости от тех целей, для которых они предназначаются. Емкость конденсатора будет тем больше, чем тоньше слой применяемого изолятора и чем больше поверхность металлических пластин или обкладок (заимствуем это название от устройства лейденских банок). Поэтому для изготовления конденсаторов большой емкости их обкладки делают из металлических листов соответственно большой поверхности и изолируют такие обкладки одну от другой, например, тонкой бумагой, которая для этой цели хорошо просушивается и затем в горячем виде тщательно пропитывается очищенным парафином. Для удобства в обращении с подобными так называемыми бумажными конденсаторами тонкие металлические обкладки, разделенные парафинированной бумагой, надлежащим образом свертываются или складываются так, чтобы все это можно было поместить в некоторую коробку, в которой конденсатор заливается парафином же. Снаружи остаются только выводы, представляющие собой какие-либо две металлические части, присоединенные к обоим обкладкам конденсатора.

24. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

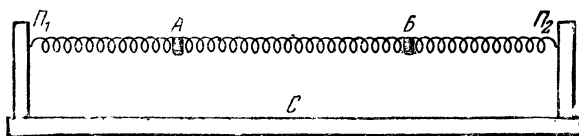
При описании разного рода электрических взаимодействий (притяжений и отталкиваний) мы рассуждали так, как будто бы все эти взаимодействия являются следствием какой-то врожденной способности электрических зарядов влиять друг на друга на расстоянии без посредства чего-либо иного, через

что и посредством чего их действия могли бы передаваться от одного к другому. Однако, если хорошо вдуматься, мысль о такого рода действии на расстоянии должна быть признана совершенно неправдоподобной и даже просто нелепой. В действительности этого не может быть. Допущение возможности подобных взаимных влияний некоторых двух тел без участия каких либо промежуточных явлений, которые совершались бы в пространстве вокруг данных взаимодействующих тел и в промежутке между ними, равносильно допущению, например, что два человека, один из которых находится внутри запертой комнаты, а другой — снаружи могут разговаривать друг с другом так, чтобы при этом звук ни в каком виде не проникал сквозь стены, окна и двери запертой комнаты.

Фарадей, много изучавший электрические явления и много размышлявший об этих явлениях, был первый, кто с полной ясностью понял необходимость признания того, что при всяком взаимодействии электрических зарядов суть дела заключается в особых явлениях, происходящих вокруг этих зарядов и в промежутке между ними. Так как электрические взаимодействия совершаются даже сквозь промежуточное пространство, не содержащее обычной материи, т. е. через так называемую пустоту, то необходимо признать, что явления, имеющие результатом различные взаимодействия между наэлектризованными телами, происходят в эфире (см. § 9, гл. 1).

Таким образом, рассматривая какое-либо наэлектризованное тело, мы не должны делать существенной ошибки и предполагать, что все дело ограничивается наличием заряда на этом теле. Мы должны твердо помнить, что всякий электрический заряд теснейшим образом связан с тем основным электрическим явлением, которое совершается в эфире, заполняющем окружающее пространство. Это пространство, окружающее наэлектризованное тело и оказывающееся полем действия особых сил, в науке принято называть электрическим полем. Руководствуясь точкой зрения Фарадея, мы можем, следовательно, утверждать, что притяжения и отталкивания, наблюдаемые между наэлектризованными телами, обнаруживаются благодаря тому, что в электрическом поле, именно в эфире между этими телами и вокруг них, происходят какие-то особые явления, нами обычно не замечаемые.

В данном случае все происходит до известной степени подобно, например, явлениям, наблюдаемым в следующих случаях. Если к борту идущего парохода на длинной веревке привязана спущенная на воду лодка так, чтобы она оказалась где-нибудь около средней части парохода, то лодка



Фиг. 14. Опыт с кажущимися притяжением и отталкиванием.

стремится коснуться борта парохода и прижаться к нему, даже когда верхний конец веревки прикреплен не к самому борту, а к концу какой-нибудь поперечной балки, выдвинутой с борта над водой, скажем, на 2—3 метра. Описывая это явление, мы говорим, что лодка притягивается к борту парохода, но при этом хорошо понимаем, что лодка сама по себе не обладает врожденной способностью притягиваться к пароходу, а что наблюдаемое притяжение есть лишь следствие различной скорости движения воды в промежутке между бортом парохода и лодкой, во-первых, и по другую сторону лодки, во-вторых. В качестве другого примера рассмотрим некоторую длинную спиральную пружину $\Pi_1\Pi_2$, слегка растянутую и закрепленную концами на деревянной стойке C (фиг. 14). В двух местах в средней части пружины как-нибудь прикрепим к ней две пробки A и B . Если теперь несколько сблизим прикрепленные к пружине пробки A и B , то почувствуем, что пробки как бы стремятся оттолкнуться одна от другой. Если несколько раздвинем пробки, то нам покажется, что они взаимно притягиваются. Мы знаем, однако, что пружина $\Pi_1\Pi_2$, как и все другие тела, в конце концов состоит из мельчайших частиц, находящихся в каком-то непрерывном движении. Растягивая одни части этой пружины и сжимая другие, мы так или иначе изменяем условия движения частиц, входящих в состав пружины в промежутках между пробками A и B и на внешних участках пружины. Отсюда и проистекают кажущиеся отталкивание и притяжение пробок A и B .

На этих простых примерах мы видим, насколько условно надо понимать весьма часто употребляемые при описании явлений природы слова «притяжение» и «отталкивание». В этом именно, чисто условном, смысле надо понимать те притяжения и отталкивания, которые мы наблюдаем в электрическом поле. Мы будем и впредь продолжать говорить о притяжениях и отталкиваниях наэлектризованных тел, когда это будет удобно при описании тех или иных явлений, подобно тому как мы можем продолжать говорить о притяжении лодки к идущему кораблю. Однако, не будем забывать, что это есть совершенно условный язык, применяемый нами для того, чтобы говорить о проявлениях электрического поля, сущность

которого до настоящего времени наукой еще не установлена. Вместе с тем не будем забывать, что не существует электрического заряда без окружающего его электрического поля. Всякий раз, когда мы будем говорить об электрических зарядах, обязательно подразумевается, что с ними всегда связаны и соответствующие электрические поля.

То обстоятельство, что замена воздуха в промежутке между пластинами конденсатора (фиг. 12) каким-либо другим изолятором, например стеклянной пластиной, увеличивает емкость конденсатора, свидетельствует об участии этого изолятора в явлениях, происходящих в электрическом поле. Вообще всякий изолятор обнаруживает подобное участие, и степень этого участия, очевидно, тем больше, чем больше будет емкость конденсатора при данном изоляторе между его обкладками по сравнению с тем, что было бы, если бы между обкладками того же конденсатора была так называемая пустота, т. е. один лишь эфир. Отношение между этими емкостями, т. е. величина большей емкости, деленная на величину меньшей емкости, дает нам численное значение так называемой диэлектрической проницаемости изолятора. Самые изоляторы, или, лучше сказать, изолирующие материалы и вещества, часто называют диэлектриками¹. Величина диэлектрической проницаемости имеет большое значение при определении того, как ведет себя в электрическом поле тот или иной изолятор (диэлектрик).

Всякий раз, когда мы наэлектризовываем какое-либо тело или заряжаем какой-либо конденсатор, мы сообщаем им некоторое количество энергии особого вида. Что это действительно так и происходит, явствует из следующего. Всякое наэлектризованное тело или, вообще говоря, всякая группа нескольких наэлектризованных тел (например, конденсатор) на самом деле обладают запасом энергии, которая может быть получена от них обратно в случае разряджения их. Весьма отчетливо это можно видеть из описанного выше опыта с получением электрической искры от заряженной лейденской банки. В промежутке между электродами, где проскакивает искра, образуется тепло. Нагревается воздух, нагреваются и сами электроды. Кроме того энергия тратится на образование света. И все это получается за счет запаса энергии в лейденской банке. Мы имеем здесь дело с преобразованием запасенной энергии в тепло и свет. Необходимо при этом заметить, что в данной лейденской банке при неизменных ее размерах и при некоторой определенной разности

¹ По-гречески «диа» значит «насквозь», «поперек». Наименование некоторых веществ диэлектриками имеет в виду указание на то, что сквозь них передаются электрические взаимодействия. Название это было предложено Фарадеем.

потенциалов запас энергии будет тем больше, чем больше диэлектрическая проницаемость стекла, из которого сделана банка. Из этого следует, что стекло принимает самое непосредственное участие в накоплении энергии. Наукой, таким образом, установлено, что энергия накапливается не на поверхности наэлектризованных тел, не в местах расположения того, что мы называем электричеством, а в электрическом поле, окружающем электрические заряды, именно в эфире и вообще в диэлектрике, заполняющем электрическое поле. Поэтому рассматриваемый вид энергии называется энергией электрического поля.

Простейшим признаком всякого электрического поля являются притяжения и отталкивания, т. е. взаимодействия, между зарядами, находящимися в этом поле. Где наблюдаются подобные взаимодействия, там есть электрическое поле. Если никаких электрических взаимодействий не может быть замечено, то, следовательно, в этом месте нет никакого электрического поля. Для обнаружения электрического поля достаточно внести в него какой-либо, хотя бы самый ничтожный, электрический заряд и обследовать, испытывает ли он действие механической силы, стремящейся передвигать его в некотором направлении. В науке принято называть электрической силой в некоторой точке поля величину напряженности того основного электрического явления, которое совершается в «пустоте» в данном месте поля. Эту величину условились считать численно равной механической силе, стремящейся двигать единицу положительного электричества, помещенную в интересующей нас точке поля. При этом необходимо представить себе, что в данном поле отсутствует обычная материя, но сохраняются все находящиеся в нем электрические заряды.

В каждой точке некоторого электрического поля электрическая сила имеет вполне определенное численное значение. В некоторой точке поля электрическая сила может быть равна, например, 100 условным единицам, в других точках — 55, 27, 3 и т. п. Вообще говоря, электрическая сила больше у поверхности заряженного тела, чем вдали от него. Это само собой следует из закона Кулона.

За направление электрической силы принято считать направление того движения, которое может быть сообщено полем положительному электричеству, помещенному в данной точке поля. То же направление принимается и за направление электрического поля в этой точке.

Энергия электрического поля, заключающаяся в некотором небольшом объеме пространства, занятого полем, зависит от величины электрической силы в данном объеме, а так-

же от величины диэлектрической проницаемости заполняющего объем изолятора. Эту зависимость установил Максвелл¹, который и показал, что энергия электрического поля распределена по всему тому объему, где обнаруживается поле.

В гл. 1 настоящей книги, в § 10, говоря об электромагнитной энергии, мы указывали, что в каждой точке на пути ее распространения обнаруживаются некоторые особые свойства. Теперь мы можем сказать, что эти особые свойства выражаются между прочим в периодически изменяющейся электрической силе во всех точках на пути распространения излученной электромагнитной энергии.

25. СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА. ЭЛЕКТРОН

Всякое обычное тело, твердое, жидкое или газообразное, т. е. всякое обычное вещество, состоит из мельчайших частиц, находящихся в непрерывном тепловом движении. Об этом мы уже упоминали в § 5 (гл. 1). Современная наука с достоверностью установила, что каждая частица вещества в свою очередь состоит из большего или меньшего числа атомов². Такое название издавна установилось в науке для обозначения самых малых количеств вещества, которые сохраняют еще главные свойства того или иного химически простого тела, например железа, меди, серы, кислорода и т. д. Оказывается, однако, что и сами атомы не являются какими-то сплошными кусочками вещества, которые в дальнейшем никак не могут распадаться на составные части. Теперь хорошо известно, что атомы состоят из еще более мелких частей и имеют в общем довольно сложное строение. Но при этом так же хорошо известно, что составные части атомов по своим свойствам уже сильно отличаются от обычного вещества.

Самое замечательное, что открыто наукой в отношении строения атомов, заключается в том, что в состав всех без исключения атомов, образующих тела природы, входят положительное и отрицательное электричества. Атомы, однако, в обычном своем состоянии кажутся совершенно ненаэлектризованными, так как они содержат одинаковое количество

¹ Джемс Клерк Максвелл (1831—1879), английский физик, последователь Фарадея, основные установки которого он полностью воспринял и развил, придя к ряду весьма важных новых результатов. Максвелл перевел на математический язык мысли Фарадея и установленные им законы. Сам Фарадей не пользовался математикой и выражал свои мысли обычным языком, который отличается у него образцовой научной точностью и определенностью.

² По гречески «áтoмoс» дословно значит «неделимый». Название «атом» было принято наукой еще в то время, когда предполагалось, что атомы действительно представляют собой предел делимости вещества.

электричества обоих знаков. Замечательно еще то, что все атомы построены из одних и тех же простейших составных частей. Атомы различаются между собой количеством этих простейших частей и их общим расположением в том непрерывном движении, в котором они пребывают. В связи с количественными различиями атомы различаются и по своим свойствам.

Особенный интерес представляют для нас те составные части атома, которые принято называть электронами¹. Электрон обладает наименьшим зарядом отрицательного электричества, который только известен в природе. Есть полное основание полагать, что отрицательное электричество, где бы и когда бы мы ни имели с ним дело, всегда состоит из целого числа электронов, не подвергающихся при этом какому-либо дроблению. Электрон приблизительно в 1840 раз легче самого легкого атома, именно — атома водорода². Атом же водорода почти в 16 раз легче атома кислорода, в 56 раз легче атома железа, в 207 раз легче атома свинца и т. п.

Скорости электронов, непрерывно движущихся в составе какого-либо атома, вообще говоря, весьма велики. На опыте удается наблюдать и подробно изучать электроны, вырвавшиеся из атомов вещества наружу.

Самыми точными опытами удалось измерить величину отрицательного заряда электрона. Заряд этот оказывается чрезвычайно малым. Для того чтобы зарядить некоторое тело небольших размеров до потенциала, который едва ощутим наиболее чувствительными измерительными приборами, требуются очень многие миллионы электронов. Современной наукой выяснено, что электрон не есть какой-либо шарик, имеющий строго определенные размеры, а представляет собой лишь не имеющий резких границ, так сказать, сгусток в том электрическом поле, которое окружает данный электрон, как и всякий электрический заряд.

С несомненностью установлено, что в середине всякого атома находится так называемое атомное ядро, содержащее положительное электричество в количестве, точно соответствующем количеству отрицательного электричества, слагающегося из всех электронов, входящих в состав данного атома. Электроны вращаются вокруг этого ядра подобно, например, движению земли и других планет вокруг солнца,

¹ «Электрон» по-гречески значит «янтарь». Почему это слово вошло в науку, об этом см. § 13 (гл. 2).

² Водород входит в состав воды, которая представляет собой химическое соединение водорода и кислорода. Каждая частица воды образована из двух атомов водорода и одного атома кислорода. В обычном своем состоянии водород есть газ, самый легкий из известных.

которое можно назвать центральным ядром солнечной системы. Самое легкое ядро находится внутри атома водорода. Оно называется *протоном*¹. Протон обладает зарядом положительного электричества, по своей величине в точности соответствующим количеству отрицательного электричества в электроны. По сравнению с электроном протон значительно тяжелее и весит почти столько же, как и атом водорода. Один протон, образующий ядро атома водорода, связан с одним электроном, с большой скоростью обращающимся вокруг ядра. Во всех других более тяжелых атомах в состав ядра входят протоны в количестве, последовательно возрастающем и доходящем в известных донине атомах химически простых тел до 92. Так, например, ядро атома кислорода содержит 8 протонов, ядро атома железа содержит 26 протонов, ядро атома урана содержит 92 протона. Кроме того, ядра атомов за исключением водородного атома заключают в себе некоторое последовательно увеличивающееся количество частичек материи не обладающих электрическим зарядом, т. е. нейтральных в электрическом отношении. Эти составные части атомных ядер называются *нейтронами*. По своему весу нейтроны весьма мало отличаются от протонов. Таким образом положительный заряд атомного ядра полностью определяется количеством заключающихся в нем протонов. Одновременно по мере перехода от атома водорода к более тяжелым атомам возрастает и число содержащихся в них электронов, всегда равное числу протонов, так что положительное и отрицательное электричества, обычно заключающиеся в любом атоме, в точности уравниваются.

Физическая наука в настоящее время очень усиленно занимается изучением ядра и вопросов, касающихся строения атомных ядер. В связи с этим надо полагать, что ближайшее будущее принесет еще немало новых данных в наши знания о строении атома вообще и о природе электронов, протонов и нейтронов в частности.

Итак, в состав каждого атома входит более или менее сложное скопление электрических зарядов, положительных и отрицательных, которые, конечно, находятся в самой тесной связи с соответствующим электрическим полем в объеме атома. Энергия этого электрического поля является одной из составных частей полной *внутриатомной энергии*. Современная наука установила, что внутриатомная энергия, заключающаяся во всех обычных телах, чрезвычайно велика и должна быть рассматриваема как один из главных запасов энергии в природе. Едва ли можно сомневаться в том, что в результате напряженной научно-исследовательской работы

¹ Греческое слово «протос» обозначает «первичный».

человечеству в конце концов удастся овладеть внутриатомной энергией и использовать ее ¹.

Во всех случаях электризации тел основную роль обычно играют электроны, так как они обладают способностью сравнительно легко отделяться от атомов и становиться в значительной степени свободными.

Для того чтобы сообщить какому-либо телу отрицательный заряд, необходимо перевести на него некоторое количество электронов с другого тела, которое, лишившись этих электронов, окажется заряженным положительно. В случае электризации трением происходит, повидимому, освобождение электронов из некоторых атомов, расположенных на поверхности трущихся тел, и образовавшиеся таким образом свободные электроны перераспределяются между этими телами в зависимости от обстоятельств, так что на одном из тел может оказаться избыток электронов, а на другом — недостаток. В случае электризации какого-либо проводящего тела через влияние свободные электроны, всегда имеющиеся в проводниках, под влиянием внешнего электрического поля устремляются в одну сторону и скопляются на соответствующей части поверхности проводящего тела, образуя здесь наведенный заряд отрицательного электричества, а на другой части поверхности проводящего тела оказывается недостаток электронов, и она представится нам заряженной положительным электричеством.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ОСНОВНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

26. ПРОИСХОЖДЕНИЕ СЛОВА «МАГНЕТИЗМ»

Еще в глубокой древности в Малой Азии, в области, называвшейся Магнезией, удавалось находить куски особой железной руды, обладавшей свойством притягивать к себе железо. Отсюда именно и произошло название магнит, которое начали применять для обозначения таких кусков железной руды, обычно именуемой теперь магнитным железняком. В настоящее время куски магнитного железняка, обладающие способностью притягивать железо, принято называть естественными магнитами, в отличие от искусственных магнитов, изготавливаемых из стальных полос и стержней самых разнообразных размеров и формы. Явления,

¹ В настоящее время это уже совершившийся факт. К сожалению, внутриатомная энергия прежде всего была использована не для мирных целей. 20 июня 1946 г.

происходящие вокруг магнитов и внутри них, называются магнитными явлениями, а предполагаемая причина этих явлений — магнетизмом.

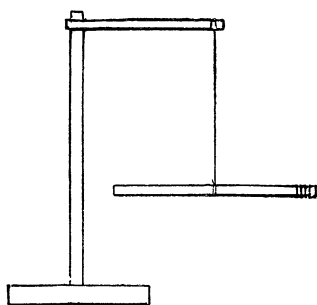
27. МАГНИТНЫЕ ПОЛЮСЫ. ДВА РОДА МАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ

Если взять длинную стальную полосу и, наложив на нее естественный магнит, несколько раз провести его вдоль полосы, то мы и получим искусственный магнит. Стальная полоса, как говорят, намагничивается и приобретает долго сохраняющееся свойство притягивать кусочки железа, например, гвозди или железные опилки. Особенно интересно то обстоятельство, что магнит притягивает железные опилки и гвозди не всей своей поверхностью. Свойство это проявляется только на определенных, сравнительно небольших, участках поверхности магнита. Эти места магнита называются магнитными полюсами или просто полюсами¹.

Опыт показывает, что, как бы мы ни намагничивали стальную полосу, число образовавшихся на ней полюсов никогда не бывает меньше двух. Есть способы намагничивать стальную полосу так, что на ней оказываются только два магнитных полюса, как раз на концах этой полосы. В таком случае стальная полоса считается намагниченной правильно. Получается обыкновенный полюсовой магнит. К концам его хорошо притягиваются и пристают мелкие железные предметы, удерживаясь более или менее сильно, в зависимости от качеств магнита. Средняя же часть поверхности магнита, так называемая нейтральная часть его, не притягивает железа.

Имея два полюсовых магнита, можно легко показать, что оба полюса одного и того же магнита, казалось бы, совершенно одинаковые в отношении притяжения кусков железа, в действительности не вполне тождественны и как-то отличаются один от другого. Подвесив один из магнитов за среднюю часть на некоторой нити, прикрепленной к стойке (фиг. 15), и как-нибудь отметив один конец этого магнита, например, обмотав его ниткой, станем приближать к отмеченному концу по очереди оба полюса другого магнита. Оказывается, что отмеченный полюс висящего магнита притягивается к одному из полюсов второго магнита и отталкивается от его другого полюса. В то же время неотмеченный полюс висящего магнита ведет себя наоборот: он отталкивается от того полюса второго магнита, к которому притягивался отмеченный полюс, и притягивается к тому полюсу второго магнита,

¹ Латинское слово «полюс» применяется для обозначения места, в котором особенно отчетливо проявляются те или иные свойства.



Фиг. 15. Подвешенный на нити полосовой магнит с отмеченным полюсом.

от которого отмеченный полюс отталкивался. Следовательно, полюсы магнитов не тождественны.

Оказывается также, что если нить подвеса (фиг. 15) достаточно тонка, то можно наблюдать еще следующее важное свойство всех магнитов, свидетельствующее о различии обоих их полюсов. В случае удаления висящего магнита от каких-либо других магнитов он всегда располагается в некотором определенном направлении, именно с севера на юг, причем к северу всегда обращается один и тот же полюс

магнита. Все происходит так, как будто бы сама земля есть большой магнит, один полюс которого находится где-то на севере, а другой где-то на юге. Принято поэтому тот полюс всякого магнита, который стремится быть обращенным к северу, называть с е в е р н ы м п о л ю с о м, а тот полюс магнита, который стремится быть обращенным к югу, — ю ж н ы м п о л ю с о м. Обычно отмечают северный полюс латинской буквой *N*, а южный полюс — латинской буквой *S*. Таким образом можно разметить оба полюса каждого магнита. Иногда отмечают северный полюс какой-либо окраской.

Опыт показывает, что все северные полюсы магнитов отталкиваются друг от друга. Точно так же отталкиваются друг от друга и все южные полюсы магнитов. Но каждый северный полюс притягивается к каждому южному полюсу и наоборот, каждый южный полюс притягивается к каждому северному полюсу. Короче говоря, одноименные магнитные полюсы взаимно отталкиваются, а разноименные полюсы взаимно притягиваются.

28. ЗАКОН КУЛОНА ДЛЯ МАГНИТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ. ЕДИНИЧНЫЙ МАГНИТНЫЙ ПОЛЮС

В § 17 (гл. 2) мы говорили о законе Кул¹она для электрических взаимодействий. Совершенно подобному же закону подчиняются и магнитные взаимодействия, обстоятельно изученные Кул¹оном. Сила, с которой взаимодействуют (притягиваются или отталкиваются) какие-либо два магнитных полюса, тем больше, чем больше величина особого магнитного

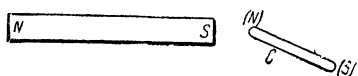
¹ Происхождение этих отметок связано с тем, что в ряде европейских языков слово, обозначающее «север», начинается буквой *N*, а слово, обозначающее «юг», начинается буквой *S*.

состояния каждого из взаимодействующих полюсов, и при уменьшении расстояния между ними увеличивается точно так же, как и в случае электрических взаимодействий, т. е. значительно быстрее, чем уменьшается расстояние между данными магнитными полюсами. Закон Кулона в области магнитных взаимодействий дает возможность вычислять силы притяжения и отталкивания между различными полюсами. При этом необходимо, конечно, условиться, в каких единицах выражать величину упомянутого особого магнитного состояния полюсов. Единица эта, называемая *единичным магнитным полюсом*, установлена была в науке о магнетизме, исходя именно из закона Кулона. Условились считать *единичным магнитным полюсом* такой полюс, который отталкивается в «пустоте» от другого такого же полюса, отстоящего на 1 сантиметр, с силой, равной одной дине. Соответственно тому, что магнитные полюсы вообще бывают северные и южные, и *единичный полюс* может быть северным и южным. Таким образом о любом магнитном полюсе мы можем говорить, что он по своим действиям равен, например, 3, 20, 75, 100 и т. д. *единичным полюсам*.

Самые точные опыты показывают, что оба полюса одного и того же магнита по своим действиям равны одному и тому же числу соответствующих *единичных полюсов*. Если взять два совершенно одинаковых полюсовых магнита, одинаково намагниченных, и сложить их так, чтобы северный полюс одного магнита плотно прилегал к южному полюсу другого и наоборот, то в отношении внешних действий они будут *нейтрализовать*, т. е. уравнивать, друг друга. Такая пара стальных полюсов по внешности будет казаться *ненамагниченной*. Они перестанут притягивать железо. Но если их разделить, они опять полностью проявят свои магнитные действия. Отсюда следует, что северный и южный полюсы как-то *противоположны* друг другу, до некоторой степени подобно положительному и отрицательному электричествам. В связи с этим иногда полюсы магнита называют *положительным* и *отрицательным*. Совершенно условно северный полюс считают *положительным*, а южный — *отрицательным*. Мы будем поэтому называть северный и южный полюсы — *противоположными полюсами*.

29. НАМАГНИЧИВАНИЕ ЧЕРЕЗ ВЛИЯНИЕ

Нечто подобное тому, с чем мы встретились при рассмотрении основных электрических явлений (см. § 21, гл. 2), наблюдается и в области магнитных явлений. Представим себе некоторый магнит VS (фиг. 16). Поднесем к одному из его полюсов, например к южному полюсу S , какой-либо стер-



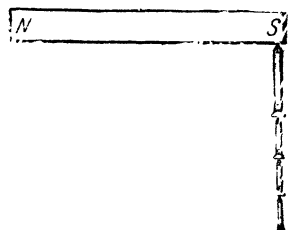
Фиг. 16. Намагничивание через влияние. Основной опыт.

жель C из хорошо отожденного мягкого железа. Опыт показывает, что в данном случае мягкое железо намагничивается через влияние со стороны магнита NS , т. е. стержень C сам становится магнитом, причем на нем образуются: временный северный полюс N' на конце, обращенном к южному полюсу S главного магнита NS , и временный южный полюс (S) на другом, более удаленном конце. Вновь образовавшиеся полюсы (N') и (S) называются временными, так как они практически совсем или почти совсем исчезают при удалении стержня C от магнита NS , если только железо достаточно чистое и надлежащим образом отождено. Что на концах железного стержня C при приближении его к магниту действительно образуются временные магнитные полюсы, в этом можно убедиться, например, поднося к нему мелкие железные гвозди, которые будут прилипать к концам стержня C , но не к его середине, т. е. совершенно так же, как и к полюсам магнита NS . Если, однако, затем удалить стержень C вместе с притянутыми им гвоздями, то он уйдет из-под влияния магнита NS , размагнитится, т. е. его временные магнитные полюсы исчезнут, и гвозди отпадут. Сильное притяжение к полюсу S поднесенного к нему конца стержня C свидетельствует о том, что на этом конце, как говорят, наводится именно северный магнитный полюс. Другой же наведенный полюс должен быть, следовательно, южным.

Если бы к железному стержню C был обращен северный полюс N главного магнита NS , то наведенные на стержне временные полюсы оказались бы уже не те, которые показаны на фиг. 16. Именно, на конце стержня C , ближайшем к магниту NS , в этом случае наводится временный южный полюс (S), а на более удаленном конце стержня C — временный северный полюс (N). Всегда вообще на ближайшей части куска железа, поднесенного к полюсу некоторого магнита, наводится противоположный полюс.

Основной опыт с намагничиванием через влияние (фиг. 16) можно различным образом видоизменять. Можно, например, изменять расстояние между железным стержнем C и полюсом магнита NS . По мере уменьшения этого расстояния намагничивание железного стержня увеличивается. Оно делается наибольшим, когда конец стержня непосредственно коснется полюса магнита, т. е. притянется к нему вплотную. Намагниченный железный стержень сам может служить для намагничивания других кусков мягкого железа также через влияние. Этот очень поучительный опыт производится, на-

пример, следующим образом (фиг. 17). В качестве стержней из мягкого железа с успехом могут быть применены обыкновенные гвозди разных размеров. Поднесем к полюсу магнита конец сравнительно большого гвоздя, который притянется и повиснет. К свободному концу первого гвоздя поднесем конец второго гвоздя, который также притянется и в свою очередь повиснет. Подобным же образом можно последовательно присоединить ряд других, меньших гвоздей, которые, прилипая один к другому, образуют ряд в виде цепочки. Но стоит только отделить первый гвоздь от полюса магнита и удалить от него, как тотчас же временное намагничение образующих цепочку гвоздей прекратится, они перестанут поддерживать друг друга, и цепочка рассыплется.



Фиг. 17. Цепочка из кусков железа, намагниченных через влияние.

Притяжение кусков железа к магниту, о чем мы говорили в самом начале настоящей главы, в § 26, всегда является следствием намагничивания этих кусков железа через влияние со стороны магнита.

Если бы вместо стержня из мягкого железа мы поднесли к полюсу магнита стальной стержень, например, обыкновенную иглу или вязальную спицу (можно также отломать некоторую часть ее), то наведенное магнитное состояние, т. е. намагничение стали, в значительной степени сохранится и после того, как этот кусок стали будет совершенно отделен от намагнитившего его основного магнита. Короче говоря, сталь обладает способностью долго сохранять остаточное намагничение. На этом именно и основано изготовление стальных магнитов той или иной формы, тех или иных размеров. Для достижения наилучшего результата сталь должна быть надлежащим образом закалена. Различные сорта стали в разной степени проявляют свойство длительно сохранять один раз приобретенное намагничение. Так как стальные магниты, обычно называемые постоянными магнитами, имеют большое практическое значение, то путем введения в состав стали некоторых примесей вырабатываются специальные сорта так называемой магнитной стали, обладающие свойством хорошо сохранять значительное остаточное намагничение.

Для намагничения небольших стальных стержней или пластинок, например, стальной иглы или отрезка часовой пружины, достаточно конец их привести в соприкосновение с одним из полюсов магнита и слегка потереть о поверхность полюса, а затем проделать то же с другим концом намагничиваемого

предмета, приложив его ко второму полюсу. Подобное трение о поверхность полюса полезно для того, чтобы сообщить мелкие сотрясения намагничиваемому веществу. Как показывает опыт, эти сотрясения весьма благоприятствуют достижению устойчивого намагничивания стали.

Кроме железа и его различных сплавов и соединений (сталей), ярко выраженными магнитными свойствами, т. е. способностью намагничиваться, обладают еще два металла — никель и кобальт, хотя и в несколько меньшей степени. Материалы, способные хорошо намагничиваться и в связи с этим могущие быть полезными для практики, обычно называют ферромагнитными материалами¹.

30. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ. МАГНИТНЫЕ ЛИНИИ

Общие соображения, изложенные нами в § 24 (гл. 2), разъяснившие чистую условность таких слов, как притяжение и отталкивание, заставляют нас и в отношении магнитных взаимодействий признать, что сущность их заключается не в какой-то таинственной способности магнитных полюсов действовать друг на друга на расстоянии, а в некоторых особых явлениях, происходящих в эфире, заполняющем то пространство, в котором наблюдаются различные магнитные действия и магнитное состояние вещества. Это пространство принято называть магнитным полем.

Магнитное поле существует всюду вокруг магнитов, где только обнаруживается какое-либо их действие. Магнитное поле существует также внутри магнитов и вообще внутри всякого вещества, находящегося под их влиянием, в частности внутри намагниченных ферромагнитных материалов. На основании всего того, что известно о магнитных явлениях, мы можем утверждать, что любое вещество принимает непосредственно участие в особых явлениях, происходящих в магнитном поле, в котором данное вещество находится. Поле это всегда сопровождается некоторыми изменениями внутри вещества. В ферромагнитных материалах подобные изменения проявляются особенно резко. В других же случаях необходимы специальные меры, чтобы это заметить.

Мы многим обязаны Фарадею в изучении магнитных полей. Фарадей был первым, кто обратил внимание на важное значение того, что происходит в магнитном поле. Именно Фарадей показал, в чем заключаются наиболее существенные свойства всякого магнитного поля, и научил нас так описывать магнитное поле, чтобы это описание было возможно

¹ Латинское слово «*férrum*» значит «железо». «Ферромагнитный» значит «способный намагничиваться подобно железу».

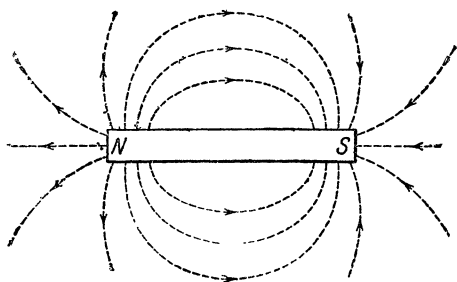
ближе к тому, что, по всей вероятности, происходит в действительности.

В § 27 настоящей главы мы указывали, что всякий свободно висящий магнит сам по себе принимает совершенно определенное положение, обращаясь одним концом приблизительно на север, другим — на юг. На этом основано устройство так называемого *компаса*¹, часто применяемого для определения направления север — юг. Компас состоит из небольшой стальной стрелки, хорошо намагниченной и насаженной средней своей частью на острие так, что она имеет возможность свободно поворачиваться во все стороны. Стрелка с поддерживающим ее острием обычно заключается в особую коробку для удобства переноски. Стремление стрелки компаса всегда устанавливаться определенным образом свидетельствует о том, что на нее действует земное магнитное поле. Но и в любом месте всякого иного магнитного поля, например, около какого-либо постоянного магнита, стрелка компаса принимает то или иное совершенно определенное направление. Из этого мы заключаем, что *в каждой точке любого магнитного поля в отношении его проявлений имеет особенное значение какое-то определенное направление.*

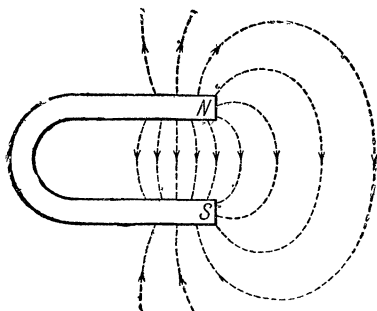
Одним из главных способов, при помощи которых можно простейшим образом обследовать и описывать магнитные поля, есть построение так называемых *магнитных спектров*². Для получения их обычно применяются железные опилки, которые посыпают сквозь некоторое сито а поверхность бумаги или, еще лучше, картона. Если положить на стол обыкновенный полосовой магнит *NS* (фиг. 18), покрыть его листом картона и затем, по возможности равномерно посыпая картон железными опилками, слегка встряхивать их слабыми ударами пальца по картону, то опилки расположатся цепочками по некоторым кривым линиям, как это представлено на фиг. 18, где для наглядности изображен и магнит, находящийся под картоном. Значение стрелок, показанных на этом и на следующих рисунках, будет объяснено дальше. Подобное расположение железных опилок можно объяснить тем, что в любой точке магнитного поля каждый кусочек железа намагничивается через влияние и затем, делаясь при встряхивании легкоподвижным, располагается вдоль определенного направления, подобно стрелке маленького компаса. При этом отдельные кусочки железа, временно превратившиеся в маленькие магнетики, подтягиваются друг к другу и образуют цепочки, которые своим направлением

¹ Слово «компас» заимствовано из английского языка.

² Латинское слово «спэктрум» обозначает «представление», «изображение».



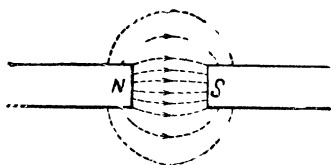
Фиг. 18. Магнитный спектр поло-
сового магнита.



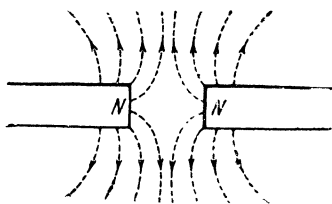
Фиг. 19. Магнитный спектр
подковообразного магнита.

в каждом месте поля показывают, как расположилась бы стрелка компаса, помещенного в этом месте. Если потом осторожно поднять картон и удалить из-под него магнит, опилки сохранят свое расположение, хотя и размагнитятся. Полученный таким образом магнитный спектр дает общее представление о том, как действует магнит в каждой точке связанного с ним поля.

В зависимости от формы магнитов и расположения их полюсов магнитные спектры имеют тот или иной вид. На фиг. 19 представлен магнитный спектр, получаемый в случае так называемого подковообразного магнита. Если положить под картон два разноименных полюса двух различных магнитов, то магнитный спектр примет вид, изображенный на фиг. 20. Вообще всегда, если мы имеем два каких угодно разноименных полюса, цепочки из опилок направляются от одного полюса к другому, как бы соединяя их. Если же мы имеем дело с двумя одноименными полюсами, безразлично, северными или южными, то магнитный спектр получает вид, представленный на фиг. 21, где ясно видно, что цепочки из опилок, отходящие от одного полюса, не идут к другому полюсу, но как бы отталкиваются от таких же цепочек, отходящих от другого одноименного полюса.



Фиг. 20. Магнитный спектр
двух сближенных разноимен-
ных полюсов разных магнитов.



Фиг. 21. Магнитный спектр двух
сближенных одноименных по-
люсов разных магнитов.

Фарадей, весьма часто пользовавшийся магнитными спектрами для общего обследования различных магнитных полей, много размышлял над тем, о чем именно говорят эти спектры. Опыт показывает, что в тех местах, где цепочки из опилок расположены наиболее густо, наиболее сильно проявляются всевозможные действия магнитного поля, и наоборот, там, где эти цепочки расположены сравнительно редко, наблюдаются сравнительно более слабые магнитные действия. Кроме того в каждой точке поля направление цепочек соответствует тому направлению, которое имеет существенное значение при всякого рода проявлениях магнитного поля. Например, вдоль направления цепочек стремится двигаться в ту или другую сторону какой-либо северный или южный полюс, помещенный в данном месте поля. Открытое Фарадеем особое вращательное действие магнитного поля на световые лучи заставляет предположить, что именно вокруг этого направления в эфире происходит какое-то вращательное движение. Очень трудно, однако, представить себе, чтобы весь эфир в пространстве, окружающем некоторый магнитный полюс, мог вращаться как одно целое. В особенности трудно это представить себе потому, что в любом месте магнитного поля приходится говорить об определенном направлении, вокруг которого совершается предполагаемое вращательное движение эфира и вдоль которого стремится двигаться всякий магнитный полюс. На основании подобных соображений необходимо считать весьма правдоподобным предположение Фарадея о том, что всякое магнитное поле заключает в себе какие-то очень тонкие нитеобразные части, которые мы условно будем в дальнейшем называть магнитными линиями.

Согласно воззрениям Фарадея магнитные спектры имеют то значение, что они дают общее представление о форме и о степени густоты магнитных линий, в действительности существующих во всяком магнитном поле. Цепочки из железных опилок являются как бы приближенным изображением магнитных линий, вдоль которых эти цепочки образуются. Таким образом на основании магнитных спектров, подобных изображенным на фиг. 18—21, мы можем судить о расположении магнитных линий в каждом частном случае.

Принято считать положительным направлением магнитной линии то направление, в котором стремился бы двигаться вдоль этой линии северный (положительный) магнитный полюс. Так как этот полюс будет отталкиваться от всякого другого северного же магнитного полюса и притягиваться к южному полюсу, то ясно, что магнитные линии, находящиеся в пространстве, окружающем всякий магнит, и связанные с ним, необходимо представлять себе исходящими

из северного полюса данного магнита и входящими в его южный полюс. Это именно и показано соответствующими стрелками на фиг. 18—21. Направление магнитных линий в любом месте поля принимается также и за направление самого поля в этом месте.

Из всего сказанного выше о необходимости допустить существование магнитных линий ни в коем случае не вытекает, будто бы они являются какими-то тонкими нитями, похожими по своей природе на какие-либо обычные нити. Такое заключение было бы в высокой степени грубой ошибкой. Фарадей, который ввел в науку представление о магнитных линиях, не делал никаких предположений об их строении. Мысль о том, что в магнитных линиях мы имеем дело с некоторым вращательным движением, была развита последователем Фарадея — Максвеллом. Есть основание полагать, что в магнитных линиях мы встречаемся с тем видом вращательного движения, который очень распространен в природе. Это — так называемое *вихревое движение*. Всем хорошо известны некоторые случаи подобного движения. Мы иногда наблюдаем водовороты, обнаруживающиеся на поверхности быстро текущей реки в виде воронок, которые сидельствуют о том, что образовавшийся в воде вихрь стремится расшириться в поперечном направлении и сократиться в продольном направлении, т. е. стянуться. Нередко при сильном ветре наблюдаются воздушные вихри. В них вращательное движение воздуха нередко увлекает с собой песок или снег, и потому мы их замечаем. Иногда воздушный вихрь настолько сильно развивается, что принимает вид очень высокого вертящегося столба, который в своем стремлении сократиться в длину и расшириться в поперечном направлении втягивает в себя с земной поверхности песок или воду, а в верхней своей части затягивает в себя облако, благодаря чему мы можем видеть этот воздушный вихрь, носящий название — «смерч». По всей вероятности, каждая отдельная магнитная линия представляет собой своего рода «смерч» в эфире. Пользуясь обычным научным языком, это можно назвать *вихревой нитью* в эфире. Скорость вращения в магнитной вихревой нити должна быть чрезвычайно велика. Поперечные размеры этой вихревой нити, т. е. «смерча» в эфире, надо полагать, весьма малы. Все, что известно о вихревых нитях вообще, весьма хорошо согласуется с основными свойствами магнитных линий. Во всяком случае, несомненно одно, а именно, что в пространстве, занятом магнитным полем, должно иметь место какое-то движение особого рода. В науке до настоящего времени нет еще окончательно решения о характере этого движения. Однако рассмотрен-

ное выше предположение о вихревом движении в магнитном поле должно быть признано наиболее правдоподобным.

Строго говоря, «линия» не имеет никаких поперечных размеров. То, что мы называем магнитной линией, надо понимать лишь как чисто условное обозначение магнитной вихревой нити, существующей в действительности.

Магнитные линии сами по себе невидимы, подобно тому как невидимы и другие явления, происходящие в эфире. Мы, например, не можем видеть тех излучений, которые исходят от отправительных устройств радиостанции, но тем не менее они, несомненно, существуют в действительности, и мы их познаем по их действиям. Точно так же, несомненно, существуют и магнитные линии, и мы их, так сказать, ощущаем на опыте по целому ряду их проявлений.

Знание основных свойств магнитных линий чрезвычайно облегчает понимание многого того, что мы наблюдаем во всяком магнитном поле. По мнению Фарадея притяжение разноименных, т. е. северного и южного, полюсов представляет собой следствие стремления сократиться по своей длине, обнаруживаемого магнитными линиями, которые всегда без исключения связывают притягивающиеся полюсы, что, например, отчетливо видно на фиг. 20. Отталкивание же одноименных полюсов, по Фарадею, объясняется тем, что магнитные линии, связанные с каждым из этих полюсов (фиг. 21), не сливаются, но расходятся от данных полюсов двумя самостоятельными пучками, которые выталкивают друг друга, благодаря боковому распылу магнитных линий, стремящихся увеличить свои поперечные размеры. По этой же причине всякий пучок магнитных линий всегда стремится возможно больше расшириться. В следующей главе мы познакомимся еще с одним весьма важным в практическом отношении случаем проявления свойств магнитных линий (см. § 36).

31. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Теперь ясно, какую значительную роль играют магнитные линии, находящиеся везде, где обнаруживается магнитное поле. Можно утверждать, что все без исключения действия магнитного поля следует рассматривать как результат особых свойств магнитных линий этого поля. Во всех случаях, при описании самых разнообразных магнитных явлений, говоря о непосредственном участии магнитных линий в этих явлениях, мы только стремимся возможно ближе подойти к тому, что происходит в действительности. При рассмотрении практических применений магнитного поля, для надлежащего их понимания и для соответствующих технических расчетов не только полезно, но и совершенно необходимо всегда преж-

де всего сосредоточивать внимание на магнитных линиях поля.

Приято называть магнитным потоком всякую группу, всякий пучок магнитных линий, сколь угодно малый или сколь угодно большой. Мы можем, следовательно, сказать, что магнитный поток складывается из отдельных магнитных линий, входящих в его состав наподобие, например, струй воды, на которые можно мысленно разделить поток воды. Но надо твердо помнить, что такое чисто внешнее сходство указанных двух потоков не дает нам никаких оснований заключить, будто бы в магнитном потоке существует какое-либо самостоятельное непрерывное движение (течение) вдоль образующих его магнитных линий. Ничего этого, конечно, нет на самом деле. Характер движений в обоих случаях совершенно разный.

Направление магнитного потока принято считать тем же, что и у образующих его магнитных линий. Таким образом мы можем сказать, что в пространстве, окружающем какой-либо магнит, магнитный поток исходит из северного полюса и входит в южный полюс.

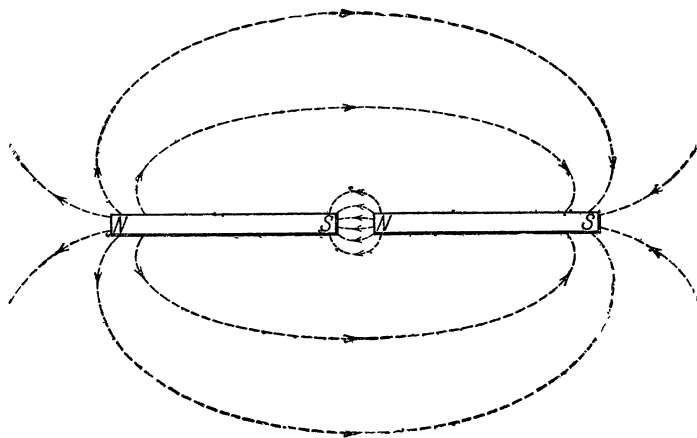
Величина магнитного потока полностью определяется числом магнитных линий, его составляющих. Однако, мы еще не знаем поперечных размеров магнитных линий (магнитных вихревых нитей), существующих в действительности, и не умеем поэтому их сосчитать в каждом частном случае. Одно только несомненно, а именно, что их поперечные размеры чрезвычайно малы. Практически для определения величины магнитного потока поступают следующим образом. Совершенно условно ведут счет единичных магнитных линий, надлежащим образом установленных на основании научных соображений в соответствии с единицами, которые приняты для измерения других величин. Итак, величину магнитного потока считают равной числу единичных магнитных линий. Эту единицу магнитного потока международным соглашением постановлено называть максвеллом, в честь английского ученого Максвелла, о котором мы уже упоминали раньше. Один максвелл, конечно, представляет собой целый пучок, состоящий из большого количества действительно существующих магнитных линий. Совершенно так же, например, установленная для измерений единица отрицательного электричества содержит в себе очень много электронов.

На единичные магнитные линии мы условно распространяем все, что было выше сказано вообще о свойствах магнитных линий.

Ввиду того что на практике нередко приходится иметь дело с магнитным потоком, измеряемым весьма большим числом максвеллов, в последнее время установлена еще

практическая единица магнитного потока, названная вёбером, в честь немецкого ученого Вёбера¹. Один вёбер равен ста миллионам максвеллов.

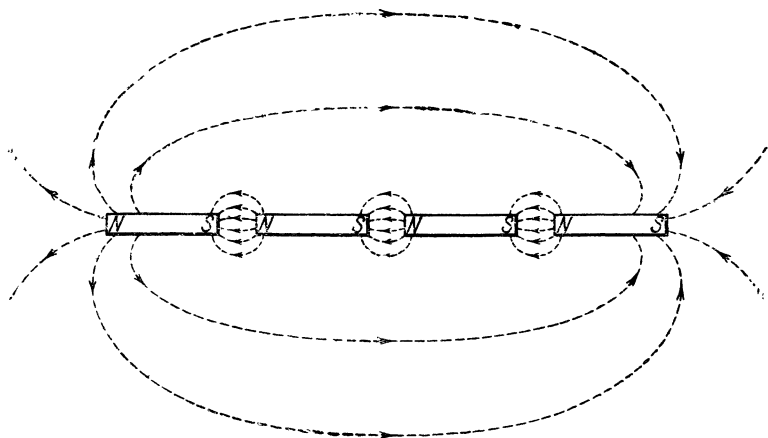
Для понимания дальнейшего весьма важно обратить внимание на установленное Фарадеем положение о непрерывности магнитного потока. Именно, каждая магнитная линия всегда образует некоторый непрерывный, вполне замкнутый контур², не имеющий ни начала, ни конца, подобно, например, кругу или бесконечному ремню, концы которого сшиты. Мы никогда в действительности не имеем возможности наблюдать концы магнитных линий. Никакими средствами мы не в состоянии разрезать магнитную линию и обнаружить ее концы. В природе существуют только замкнутые магнитные линии, так что магнитный поток, ими образуемый, всегда замыкается сам на себя, оставаясь непрерывным. На основании общего вида магнитных спектров, изображенных на фиг. 18—21, можно подумать, что магнитные линии заканчиваются на полюсах магнитов. Однако, это только так кажется. В действительности же магнитные линии не обрываются на полюсах, а непрерывно продолжаются внутри магнитов. Это обнаруживается между прочим на нижеследующем опыте. Если взять, например, какую-либо намагниченную стальную полоску и разломить ее в средней части, т. е. в том месте, где обычно не наблюдается никаких магнитных



Фиг. 22. Опыт с разламыванием магнита. Один излом.

¹ Вёбер (1804—1891)—немецкий физик, известный своими исследованиями в области электрических и магнитных явлений.

² Французское слово «контур» значит «обвод» и применяется для общего обозначения линии, охватывающей какой-либо участок поверхности.

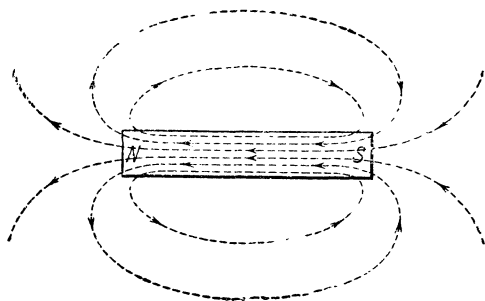


Фиг. 23. Опыт с разламыванием магнита. Три излома.

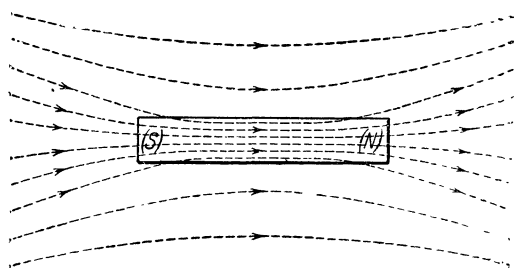
проявлений и где железные опилки совсем не притягиваются, то на месте излома обнаруживаются новые магнитные полюсы (фиг. 22), так согласованные с первоначальными полюсами на концах взятой намагниченной пластинки, что каждая из получившихся более коротких пластинок оказывается самостоятельным магнитом с двумя противоположными полюсами — северным и южным. Опыт разламывания магнита мы можем повторить с каждой отдельной частью основной стальной пластинки и продолжать это сколь угодно долго, получая все более и более короткие новые магниты. Всегда при этом в образовавшихся щелях, между появившимися после излома новыми полюсами, обнаруживаются магнитные линии, идущие от северного полюса к южному (фиг. 23). Как показывают самые точные измерения; величина магнитного потока, т. е. число составляющих его единичных магнитных линий, неизменно сохраняется, будем ли мы говорить о магнитном потоке, исходящем из крайнего северного полюса и входящего в крайний южный полюс, или мы имеем в виду магнитный поток, проходящий сквозь любую из образовавшихся поперечных щелей в магните. На фиг. 23 ясно видно, что направление всех магнитных линий как во внешнем поле, так и в местах изломов оказывается согласованным в том смысле, что если мысленно продолжить эти магнитные линии внутри частей основного магнита, то получаются замкнутые линии, в которых не прерывается одно и то же направление, показанное стрелками на фиг. 23. Если, наконец, принять во внимание, что места излома основного магнита могут быть выбраны совершенно произвольно и результат от этого несколько не изменяется, то приходится признать следующее:

магнитный поток, исходящий наружу из северного полюса любого магнита и входящий в южный полюс того же магнита, не прерываясь, проходит внутри самого магнита от южного полюса к северному. Таким образом каждая магнитная линия, входящая в состав этого магнитного потока, является вполне непрерывной и замкнутой. На основании сказанного, магнитный поток, связанный с каким-либо магнитом, необходимо представлять себе именно так, как это показано на фиг. 24. Северный и южный полюсы всякого магнита (постоянного или временного, безразлично) представляют собой лишь те части поверхности магнита, через которые магнитный поток выходит из магнита наружу или входит снаружи внутрь магнита.

Во всех случаях намагничивания какого-либо куска железа через влияние существо дела заключается в том, что магнитный поток данного поля некоторой своей частью заходит внутрь куска железа и проходит его насквозь. Место входа магнитного потока внутрь железа представляется нам в виде наведенного южного полюса, место же выхода магнитного потока из железа оказывается наведенным северным полюсом образовавшегося временного магнита. На фиг. 25 представлено в общих чертах распределение магнитных линий потока, который проходит через кусок железа, намагничиваемый через влияние и образующий временный магнит (N) (S). Вне куска железа эти магнитные линии могут быть выслежены при помощи магнитного спектра; внутри же куска железа мы их дополняем согласно положению о непрерывности магнитного потока.



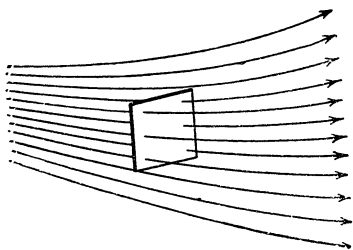
Фиг. 24. Непрерывность магнитных линий, проходящих частью вне магнита, частью — сквозь него.



Фиг. 25. Непрерывность магнитных линий в случае намагничивания куска железа через влияние.

32. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

При рассмотрении магнитных спектров, изображенных на фиг. 18—23, а также при рассмотрении общего расположения магнитных линий в случаях, представленных на фиг. 24 и 25, можно отчетливо видеть, что магнитный поток имеет не везде одинаковую густоту. Есть места, где магнитные линии, его образующие, расположены сравнительно близко одна от другой. Это особенно резко проявляется внутри железа и стали. Здесь магнитные линии сильно сгущены. В других местах магнитные линии расположены реже, причем густота их меняется от места к месту. Итак, магнитные линии бывают в большей или меньшей степени сгущены, или, как иногда говорят, уплотнены. При описа-



Фиг. 26. Единичные магнитные линии, проходящие сквозь 1 квадратный сантиметр поперечной поверхности. Плотность магнитного потока.

де одинаковую густоту. Есть места, где магнитные линии, его образующие, расположены сравнительно близко одна от другой. Это особенно резко проявляется внутри железа и стали. Здесь магнитные линии сильно сгущены. В других местах магнитные линии расположены реже, причем густота их меняется от места к месту. Итак, магнитные линии бывают в большей или меньшей степени сгущены, или, как иногда говорят, уплотнены. При описа-

нии и изучении различных магнитных явлений мы можем, следовательно, говорить о густоте или плотности магнитного потока.

В науке принято называть плотность магнитного потока магнитной индукцией¹. Условились измерять величину магнитной индукции числом единичных магнитных линий, которые проходят сквозь 1 квадратный сантиметр поверхности, проведенной в данном месте поперек магнитного потока, т. е. величиной магнитного потока, пронизывающего указанную площадку в 1 квадратный сантиметр и выраженного в максвеллах.

На фиг. 26 показана такая площадка в 1 квадратный сантиметр, сквозь которую проходят 6 единичных магнитных линий.

Единицей магнитной индукции служит, очевидно, такая плотность магнитного потока, при которой сквозь 1 квадратный сантиметр поперечной поверхности проходит одна единичная магнитная линия, т. е. один максвелл. Иными словами, единицей магнитной индукции является максвелл на квадратный сантиметр. Международным соглаше-

¹ Латинское слово «индукцию» значит «наведение». Слово «индукция» первоначально применялось именно при описании явления намагничивания железа через влияние, т. е. наведения магнитного состояния, когда магнитные линии уплотняются в железе.

нием постановлено называть эту единицу магнитной индукции *гауссом*, в честь немецкого ученого Гаусса¹.

Таким образом мы можем сказать, что в случае, изображенном на фиг. 26, магнитная индукция в месте расположения площадки в 1 квадратный сантиметр равна 6 гауссам. В технике часто приходится иметь дело со значительно большими магнитными индукциями. В воздухе магнитная индукция сравнительно редко доходит до десятков тысяч гауссов. Но в железе и в стали магнитная индукция около 10 000—15 000 гауссов является довольно обычной, а в отдельных случаях она повышается до 20 000—30 000 гауссов. В случае постоянных магнитов внутри стали сохраняется остаточная магнитная индукция, величина которой колеблется приблизительно от 5 000 до 10 000 гауссов. В некоторых специальных приборах, предназначенных для научных исследований, особыми мерами удается доводить магнитную индукцию в воздухе до 100 000 гауссов и в отдельных случаях даже до 1 000 000 гауссов. Надо полагать, что в магнитном поле, которое находится внутри атомов наряду с электрическим полем, магнитная индукция достигает нескольких миллионов гауссов.

Знание магнитной индукции в каждом частном случае позволяет вычислять величину магнитного потока, с которым мы имеем дело. Например, если площадь поперечного сечения некоторого постоянного магнита равна 5 квадратным сантиметрам и мы знаем, что в его средней части магнитная индукция имеет во всех местах одно и то же значение, равное 7 000 гауссов, то, умножая магнитную индукцию на площадь, получаем величину связанного с магнитом потока, равную 35 000 максвеллов. Это следует из того, что магнитная индукция в 7 000 гауссов равна 7 000 максвеллов на 1 квадратный сантиметр. Если, далее, в случае какого-либо толстого железного стержня, вдоль которого проходит магнитный поток, мы знаем, что магнитная индукция в железе при этом равна, например, 16 000 гауссов, и площадь поперечного сечения стержня равна 1 000 квадратных сантиметров, то магнитный поток равен

$$16\,000 \times 1\,000 = 16\,000\,000 \text{ максвеллов.}$$

Наоборот, измерив какой-либо магнитный поток и выразив его в максвеллах, мы можем разделить эту величину на площадь поперечного сечения данного потока (в квадратных сантиметрах) и получить таким образом величину соответствующей магнитной индукции, выраженную в гауссах.

¹ Гаусс (1777—1855) известен своими многочисленными работами в области математики, астрономии и физики. Он был одним из основателей математической теории магнитного поля.

33. МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Внимательное рассмотрение фиг. 25 приводит нас к заключению, что железо, будучи внесено в какое-либо магнитное поле, как бы привлекает к себе магнитные линии, и они значительно уплотняются в нем по сравнению с распределением магнитных линий в данном месте поля до внесения в него железа. Опыт показывает, что внесение в магнитное поле железа, стали и других ферромагнитных материалов всегда сопровождается уплотнением в них магнитного потока. Эти материалы предоставляют магнитному потоку более легкий путь и оказываются более проницаемыми для магнитных линий, чем пространство, не заполненное обычным веществом, т. е. чем «пустота» (эфир).

Принято называть магнитной проницаемостью свойство разных видов материи в большей или меньшей степени легко проводить магнитный поток. Мы можем, например, сказать, что магнитная проницаемость железа, стали и чугуна во много раз больше, чем магнитная проницаемость «пустоты» и огромного большинства металлов вообще, за исключением никеля и кобальта, магнитная проницаемость которых все же очень велика, хотя и меньше, чем у железа. Магнитная проницаемость воздуха настолько мало превышает магнитную проницаемость «пустоты», что при практических подсчетах их обычно считают равными.

Вполне условно магнитную проницаемость «пустоты» можно принять за единицу. В таком случае численное значение магнитной проницаемости какого-либо материала, например, железа, будет во столько раз больше единицы, во сколько раз плотность магнитного потока в железе, т. е. магнитная индукция в железе, больше, чем в «пустоте», при тех же общих условиях. Необходимо при этом иметь в виду следующее: предполагается, что тело, вносимое в магнитное поле, не было предварительно намагничено и приобрело магнитное состояние только под влиянием данного поля.

Магнитная проницаемость железа и стали, которые широко применяются в электротехнике, обычно имеет численную величину в пределах примерно от 100 до 1 000 и выше в зависимости от обстоятельств.

34. МАГНИТНАЯ СИЛА

При изучении всякого магнитного поля в науке принято кроме указанных выше основных величин (магнитный поток, магнитная индукция, магнитная проницаемость) рассматривать еще ту силу, с которой поле может действовать в каком-либо месте на помещенный здесь магнитный полюс, остаю-

щийся одним и тем же при обследовании всех точек магнитного поля. Условились всегда применять для этой цели единственный северный магнитный полюс. Величину напряженности магнитного явления, происходящего в «пустоте» в некоторой точке поля, называют магнитной силой. Ее считают численно равной именно той механической силе, которая стремилась бы двигать единственный северный полюс, помещенный в интересующем нас месте поля при отсутствии обычного вещества, но при неизменности всех прочих условий. Отсюда вытекает, что единицей магнитной силы мы можем считать магнитную силу такого поля, которое действует в «пустоте» на единственный магнитный полюс с силой, равной одной дине. Международным соглашением постановлено называть эту единицу магнитной силы эрстедом, в честь датского ученого Эрстеда¹.

В виде примера мы можем указать, что магнитная сила земного поля равна в Москве приблизительно $\frac{1}{6}$ эрстеда. Применяемые в технике поля имеют обычно во много раз большую магнитную силу. Величина ее нередко выражается десятками и даже сотнями эрстедов. В исключительных случаях мы на опыте встречаемся с полями, в которых магнитная сила выражается тысячами, десятками тысяч и даже сотнями тысяч эрстедов.

Совершенно очевидно, что магнитная сила в некотором месте поля по своей величине должна быть тесно связана с магнитной индукцией в этом же месте. Обе они в конце концов как-то, хотя и по-разному, говорят нам об одном и том же магнитном явлении, происходящем в поле. Вышеуказанные единицы, служащие для измерения магнитной силы и магнитной индукции, т. е. эрстед и гаусс, так подобраны, что они строго соответствуют одна другой в случае магнитного поля в так называемой «пустоте», т. е. в эфире. В этом случае магнитная сила равна одному эрстеду, когда магнитная индукция равна одному гауссу, и наоборот, магнитная индукция равна одному гауссу, когда магнитная сила равна одному эрстеду. Но если в такое поле помещено, например, железо, то магнитная индукция в этом месте при той же магнитной силе значительно возрастет по сравнению с тем, что было раньше до внесения железа, так как магнитная проницаемость его много больше, чем у «пустоты». Для получения величины магнитной проницаемости в каждом частном случае необходимо разделить магнитную индукцию, выраженную в гауссах, на магнитную силу в том же месте поля, выражен-

¹ Эрстед (1777—1851)—знаменитый датский физик и химик, который произвел имеющие большое значение исследования в области магнитного поля.

ную в эрстедах. Таким образом мы имеем следующее основное соотношение:

$$\text{величина магнитной проницаемости} = \frac{\text{число гауссов}}{\text{число эрстедов}}.$$

Вследствие взаимной согласованности эрстеда и гаусса для «пустоты» при отсутствии какого-либо обычного вещества мы всегда имеем:

$$\text{магнитная проницаемость „пустоты“} = \frac{\text{число гауссов}}{\text{число эрстедов}} = 1.$$

Вообще в каждой точке магнитного поля, умножая величину магнитной силы (в эрстедах) на магнитную проницаемость, получим величину магнитной индукции (в гауссах):

$$\text{Магнитная индукция} = \text{магнитная сила} \times \text{магнитная проницаемость}.$$

В случае ферромагнитных материалов предполагается, что данное вещество не было предварительно намагничено и приобрело магнитное состояние только под влиянием воздевающей на него магнитной силы. Вместе с тем необходимо иметь в виду, что магнитная проницаемость железа и других ферромагнитных материалов не есть величина постоянная, но в значительной степени зависит от магнитной силы, под действием которой данный материал намагничивается.

За направление магнитной силы условно принимают направление движения находящегося под ее влиянием северного полюса. В «пустоте», т. е. в эфире, а также в воздухе и во многих других случаях, магнитная сила в некотором месте поля имеет то же направление, что и магнитная линия, проходящая через это место поля. Направлением самого магнитного поля в каждой его точке считается именно направление магнитной силы в данной точке.

Так как совершенно невозможно создать в полном смысле слова уединенный магнитный полюс, который в действительности всегда принадлежит некоторому магниту, обязательно имеющему и второй противоположный полюс, то обычно для обнаружения магнитного поля и определения его направления в пространство, где предполагается наличие этого поля, вносят какую-либо подвижную магнитную стрелку, например, стрелку маленького компаса. Если в данном месте есть магнитное поле, то немедленно же проявится действие магнитной силы на полюсы стрелки. Именно под влиянием ее северный

полюс стрелки будет стремиться двигаться по направлению ее, а южный полюс стрелки — в обратном направлении. Вследствие этого стрелка компаса соответственным образом повернется и придет в спокойное состояние, когда установится в направлении магнитной силы и самого поля.

35. ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Эфир, в котором происходят магнитные явления и который находится при этом в состоянии какого-то движения, оказывается носителем энергии особого рода, называемой энергией магнитного поля. Эта энергия, как установил Максвелл, распределена по всему пространству, занятому магнитным полем. Он показал, что везде, где обнаруживается магнитная сила, т. е. где существует поле, есть и энергия магнитного поля. Зная величину магнитной силы и магнитную индукцию в любом месте поля, мы легко можем вычислить энергию магнитного поля, заключающуюся в некотором объеме.

Энергия магнитного поля, будучи энергией движения эфира, имеет все основные свойства кинетической энергии вообще. Такое представление о существе энергии магнитного поля Максвелл подробно развил в своих работах по электричеству и магнетизму.

В § 25 (гл. 2) мы говорили о внутриатомной энергии. Значительную долю этой энергии составляет энергия магнитного поля, всегда существующего в каждом атоме наряду с электрическим полем.

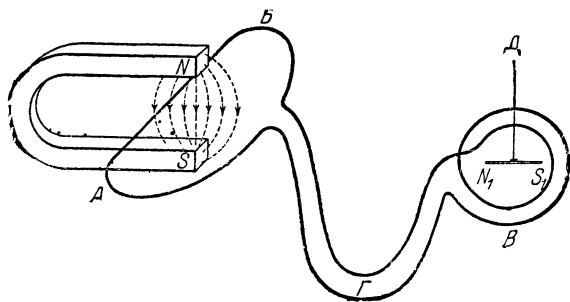
В конце § 24 (гл. 2) мы указывали, что во всех точках на пути распространения лучистой энергии обнаруживается периодически изменяющаяся электрическая сила. Одновременно с этим в тех же точках обнаруживается и периодически изменяющаяся магнитная сила. Другими словами, в каждой точке на пути распространения лучистой энергии мы встречаемся с периодически изменяющимися электрическим и магнитным полями. По этой именно причине особые колебания, совершающиеся на пути лучистой энергии, называются электромагнитными колебаниями. Количество лучистой энергии, заключающейся в каждый данный момент времени в некотором объеме пространства, через который эта энергия проходит, в точности равно сумме энергии электрического поля и энергии магнитного поля в рассматриваемом объеме. Лучистая энергия, следовательно, есть в полном смысле слова электромагнитная энергия.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

36. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ ТОКА

До сих пор, изучая магнитное поле, мы мысленно связывали его с каким-либо магнитом или группой магнитов. Существуют, однако, еще и другие условия, на первый взгляд совсем иного рода, при которых также обнаруживается магнитное поле.

Представим себе металлическую проволоку $АВВГ$ (фиг. 27), концы которой плотно соединены между собой, например, спаяны, благодаря чему образуется так называемая замкнутая металлическая цепь. Часть этой металлической цепи, $АБ$, располагается между полюсами NS неподвижного подковообразного магнита, поперек связанного с ним магнитного потока. Другая часть рассматриваемой цепи, закрепленная неподвижно, образует собой несколько витков $В$, изолированных друг от друга, например, благодаря тому, что проволока покрыта какой-либо не проводящей электричества оболочкой (изолирующей обмоткой). Внутри витков $В$ поместим небольшую магнитную стрелку N_1S_1 , свободно подвешенную на длинной тонкой нити, закрепленной в точке $Д$. Следует оговориться, что применение нескольких витков вместо одного по существу неважно и делается только для усиления наблюдаемых явлений. С этой же целью самые витки следует установить в том же направлении, в котором располагается магнитная стрелка N_1S_1 под влиянием магнитного поля земли. При этом неподвижный магнит NS может находиться сколь угодно далеко от витков $В$ и висящей в них стрелки N_1S_1 . Часть цепи $Г$ делается гибкой для того, чтобы при неподвижности витков $В$ можно было несколько передвигать часть цепи $АБ$.



Фиг. 27. Основной опыт с электромагнитной индукцией тока.

Если теперь, в описанных условиях, мы начнем двигать участок проволоки AB между полюсами магнита N и S поперек магнитного потока, т. е. так, чтобы при этом магнитные линии как бы пересекались проволокой, то во все время такого движения можно обнаружить близ всех без исключения частей замкнутой металлической цепи $ABBG$ магнитное поле, исчезающее вместе с прекращением перерезывания магнитных линий частями данной цепи. Это вновь возникающее магнитное поле проще всего обнаружить по его действию на магнитную стрелку, расположенную близ любой части рассматриваемой проволоки, и особенно резко это проявится на стрелке $N_1 S_1$, находящейся в условиях особо благоприятных. Именно мы увидим, что во все время пересечения магнитных линий рассматриваемой металлической цепью стрелка $N_1 S_1$ будет отклоняться, стремясь стать поперек проволоки, образующей витки B . Из этого мы заключаем, что *в описываемых условиях возникает магнитная сила в направлении, поперечном относительно проволоки*. И это справедливо по отношению ко всем частям данной замкнутой цепи. Замечательно то, что указанные явления имеют место совершенно независимо от того, каковы размеры металлической цепи, и независимо от того, например, как велико расстояние между частью AB ,двигающейся между полюсами магнита N и S , и витками B . Оно может быть равно десяткам метров, десяткам, сотням, тысячам километров. Это доказывает, что от места пересечения магнитных линий некоторой частью замкнутой металлической цепи распространяются вдоль всей проволоки особые явления, обнаруживаемые в описанном опыте при помощи магнитной стрелки $N_1 S$. Сама проволока служит как бы рельсами, вдоль которых распространяются указанные явления. Достоверно известно, что при этом внутри проволоки происходит передвижение электричества, которое течет вдоль всей замкнутой цепи. Последнее обстоятельство было основной причиной того, что издавна установилось название электрический ток для обозначения всего того, по существу, сложного электромагнитного явления, возникновение которого мы рассматриваем теперь в условиях, представленных на фиг. 27. Возбуждение электрического тока при пересечении магнитных линий замкнутой металлической цепью было открыто Фарадеом в 1831 г. и обычно называется электромагнитной индукцией тока, т. е. электромагнитным наведением тока. Электрический ток, появляющийся вследствие электромагнитной индукции, принято называть индуктированным или наведенным током.

Замкнутая цепь, по которой течет электрический ток, носит название цепи электрического тока, или просто

электрической цепи. Металлическая проволока, из которой составляется электрическая цепь, называется проводником или проводом. Если бы концы проводника, образующего электрическую цепь, не были соединены между собой, т. е. не были бы в контакте¹ друг с другом, то цепь была бы разомкнута. Как показывает опыт, в такой разомкнутой цепи, в условиях, представленных на фиг. 27, явление электрического тока практически не возникает. Замкнутость электрической цепи представляет собой основное условие для того, чтобы ток мог более или менее длительно протекать и неизменно обнаруживать свои свойства, главным из которых оказывается магнитное поле, безусловно всегда существующее вокруг проводника с током.

Описывая основной опыт индуктирования электрического тока (фиг. 27), мы говорили о «пересечении» магнитных линий. Это «пересечение» не следует понимать в буквальном смысле слова. В действительности мы не можем каким бы то ни было способом разрезать магнитную линию. Об этом уже была речь в § 31 (предыдущая глава), где мы разъясняли установленное Фарадеем положение о непрерывности магнитного потока. Слова «пересечение магнитных линий», которыми мы обыкновенно пользуемся при описании электромагнитной индукции тока, надо понимать только в том смысле, что *проводник движется поперек магнитного потока* и проходит сквозь него, *как бы пересекая магнитные линии*, которые при этом проникают внутрь проводника или претерпевают некоторые особые преобразования, не нарушающие непрерывности магнитных линий.

В гл. 1 (§ 12) мы уже говорили о движении электромагнитной энергии вдоль проволоки и указывали, что явления, происходящие при этом вокруг проволоки и внутри нее, принято кратко описывать словами «по проволоке течет электрический ток». В рассматриваемом теперь случае возникновения индуктированного тока (фиг. 27) мы также имеем дело с электромагнитной энергией, которая распространяется вдоль всей цепи *АВВГ*. Оказывается, что вокруг проводника с током кроме магнитного поля обычно наблюдается еще и поле электрическое. Можно с достоверностью утверждать, что энергия, движущаяся сквозь пространство, в котором обнаруживаются магнитное поле тока и сопутствующее ему электрическое поле, черпается в том месте, где происходит так называемое пересечение магнитных линий проводником. Энергия эта, являющаяся, по существу, электромагнитной энергией и называемая энергией электрического тока, в данном случае получается за счет механической работы

¹ См. примечания в конце § 23.

того двигателя, который перемещает проводник поперек магнитного потока. В дальнейшем энергия электрического тока претерпевает ряд преобразований, например, превращается в тепло, обычно появляющееся внутри проводника, по которому течет ток, или может обратно превращаться в механическую работу при посредстве электродвигателей.

Что касается движения электричества внутри проводника, то оно происходит в строгом соответствии с магнитным полем, всегда без исключения обнаруживаемым вокруг проводника, по которому течет электрический ток. Вместе с тем именно это движение электричества позволяет электромагнитной энергии, находящейся в пространстве вокруг проводника с током, быть, так сказать, связанной с данным проводником и распространяться вдоль него. Таким образом, благодаря движению электричества, проводник оказывается, по меткому выражению Фарадея, той осью, вокруг которой совершаются явления, имеющие особо существенное значение с точки зрения энергии электрического тока.

Открытие электромагнитной индукции тока имело очень большое практическое значение. В дальнейшем мы познакомимся с некоторыми другими источниками электрического тока. Но они в современном энергетическом хозяйстве не имеют почти никакого значения по сравнению с генераторами электрической (электромагнитной) энергии, основанными на величайшем открытии Фарадея. Широкое развитие применений электрической энергии в наши дни самым непосредственным образом связано с этим открытием.

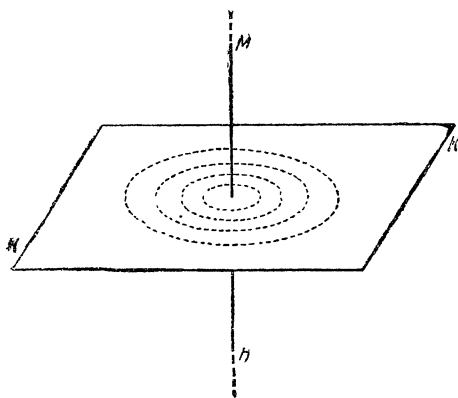
Прежде чем перейти к рассмотрению основных свойств электрического тока, полезно обратить внимание на то обстоятельство, что представленное на фиг. 27 общее расположение опыта с электромагнитной индукцией тока содержит в себе в зачаточном виде наиболее существенные части всякого современного устройства для производства, передачи и использования электрической энергии. Часть цепи AB совместно с магнитом NS играет роль генератора электрической энергии. Это — прообраз электрической станции. Часть цепи B с магнитной стрелкой N_1S_1 играет роль приемника электрической энергии. Это — прообраз электродвигателя, т. е. такого механизма, в котором при помощи электрического тока создается движение. В данном случае при помощи индуктированного тока приводится в движение магнитная стрелка N_1S_1 . Исходя из закона сохранения энергии, мы можем утверждать, что механическая работа, которая совершается при передвижении стрелки N_1S_1 в части B , играющей роль электродвигателя, должна черпаться от того первичного двигателя, который перемещает часть цепи AB — наш генератор тока. В действительности это именно так и

происходит. На электрических станциях генераторы электрического тока берут энергию от приводящих их в движение первичных двигателей, тепловых или гидравлических, и превращают ее в энергию электрического тока. В электрических же двигателях энергия тока претерпевает обратное преобразование в механическую работу. Проволоки Γ , соединяющие генератор с приемником, в нашем случае AB с B , представляют собой так называемую линию передачи в зачаточном виде.

В опыте, который представлен на фиг. 27, обнаруживаются при внимательном обследовании все основные свойства электрического тока. К более или менее подробному рассмотрению этих свойств мы и переходим.

37. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА

В основном опыте электромагнитной индукции тока, описанном в предыдущем параграфе, мы уже имели дело с магнитным полем электрического тока и наблюдали его действие на магнитную стрелку. Мы видели, что это магнитное поле направлено поперек проводника с током. Для того чтобы ближе ознакомиться с характером магнитного поля тока и с формой магнитных линий, находящихся в этом поле, можно воспользоваться тем же способом, каким мы уже исследовали магнитное поле магнитов, именно — применить железные опилки (см. § 30) и получить магнитный спектр тока. Итак, взяв ради простоты какой-либо прямолинейный участок цепи, по которой идет электрический ток, мы можем следующим образом провести опыт получения магнитного спектра

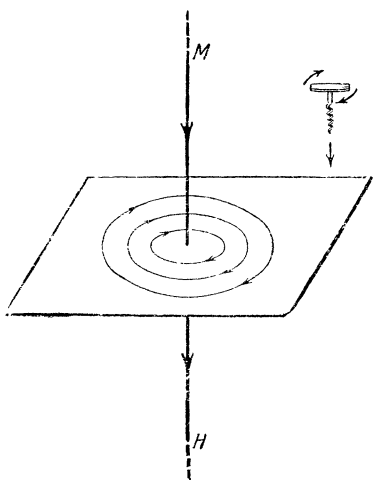


Фиг. 28. Магнитный спектр поля прямолинейного тока.

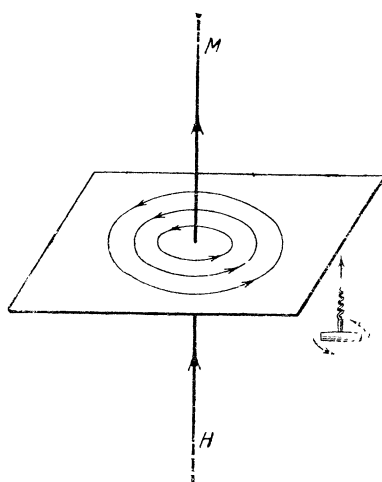
в этом случае. Берем кусок картона KK (фиг. 28), располагаем его горизонтально и пропускаем через отверстие в картоне прямолинейный участок MN некоторой электрической цепи. Далее, посыпая на картон железные опилки и, в то время как по MN идет электрический ток, встряхиваем их, слегка постукивая по картону. Получающаяся при этом картина магнитного спектра показывает нам, что магнитные линии

прямолинейного тока имеют форму кругов, центры которых лежат на оси проводника. Кроме того мы в данном случае воочию убеждаемся, что магнитные линии действительно представляют собой замкнутые кривые, и таким образом основное положение о непрерывности магнитного потока (§ 31) оправдывается и на магнитном поле тока. И это справедливо, как показывает непосредственный опыт, во всех без исключения случаях магнитного поля тока. Как бы ни была сложна цепь электрического тока, какова бы ни была форма получающихся при этом магнитных линий, мы всегда неизменно имеем дело с замкнутыми магнитными линиями, с замкнутым магнитным потоком. При этом замечательно еще следующее обстоятельство. Каждая магнитная линия, принадлежащая магнитному полю тока, обязательно охватывает кругом проводник с током. В магнитном поле тока нет иных магнитных линий. И если принять еще во внимание, что всякий электрический ток всегда протекает по замкнутому пути, то мы приходим к выводу, что *электрический ток и образуемый им магнитный поток связаны между собой, как звенья цепи.*

При рассмотрении магнитного поля тока необходимо еще иметь в виду одно существенное обстоятельство, которое мы пока оставляли без внимания. Речь идет о направлении этого магнитного поля. Опыт, производимый хотя бы в той простейшей форме, которая представлена на фиг. 27, показывает нам, что направление магнитного поля может быть двоякое: магнитная стрелка $N_1 S_1$ отклоняется от положения равновесия то в одну, то в другую сторону в зависимости от того, в какую сторону перемещается проводник AB , пересекающий поток магнита NS . Из этого мы заключаем, что электрический ток есть явление, имеющее в проводнике некоторое определенное направление, одно из двух возможных (в зависимости от обстоятельств). Каждому направлению тока соответствует совершенно определенное направление связанного с ним магнитного поля. Совершенно естественно, что за направление тока условились считать направление движения положительного электричества в проводнике. Вместе с тем направление магнитного поля определяется (также чисто условно) направлением движения северного полюса. Остается установить, как бывает связано направление электрического тока с направлением того магнитного поля, которое всегда обнаруживается вокруг проводника с током. Оказывается, что рассматриваемые два направления связаны между собой так называемым правилом правого винта или *правилом штопора*. Именно *направление тока в проводнике есть то направление, в котором двигалась бы ось винта штопора, если бы рукоятка его вращалась в направлении магнитного поля, существующего вокруг проводника.*

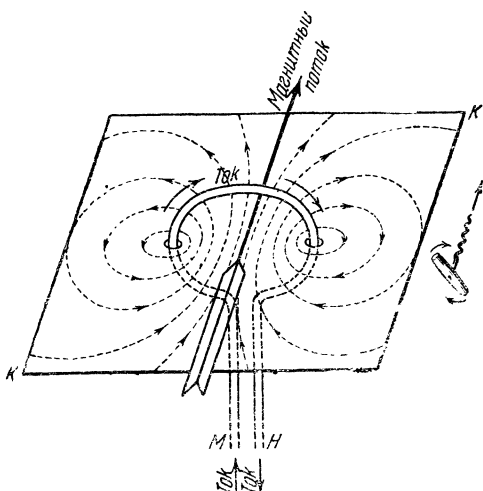


Фиг. 29. Соотношение направлений тока и магнитного поля тока (правило штопора). Ток идет сверху вниз.



Фиг. 30. Соотношение направлений тока и магнитного поля тока (правило штопора). Ток идет снизу вверх.

Таким образом в опыте, представленном на фиг. 28, электрический ток направлен от M к H или от H к M в зависимости от того, будет ли магнитное поле при взгляде на магнитный спектр сверху направлено по часовой стрелке или против часовой стрелки. Фиг. 29 и 30 поясняют вышесказанное. Для ясности в обоих случаях направление поля и соответствующее ему согласно правилу штопора направление электрического тока показаны при помощи стрелок.

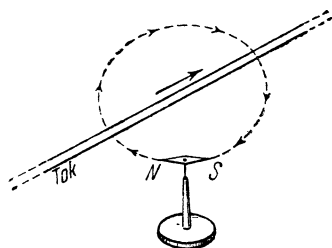


Фиг. 31. Магнитное поле кругового тока.

На фиг. 31 представлена общая картина расположения магнитных линий в спектре кругового тока. Подобного рода магнитный спектр можно получить, посыпая железные опилки на кусок картона KK , сквозь отверстия которого пропущен согнутый

На фиг. 31 представлена общая картина расположения магнитных линий в спектре кругового тока. Подобного рода магнитный спектр можно получить, посыпая железные опилки на кусок картона KK , сквозь отверстия которого пропущен согнутый

кольцом проводник MH с током. Стрелками показаны направления электрического тока и магнитных линий. Большая стрелка показывает общее направление образующегося магнитного потока, который пронизывает проволоочное кольцо, обтекаемое током. Из этого же рисунка можно усмотреть, что правило штопора будет справедливо и в такой форме: *направление тока есть то направление, в котором нужно вращать рукоятку штопора, чтобы ось его винта двигалась вдоль магнитных линий, пронизывающих цепь тока.*



Фиг. 32. Определение направления электрического тока при помощи магнитной стрелки.

Соединяя обе формулировки правила штопора в одну, мы можем, следовательно, сказать: *направление тока и направление сопряженного с ним магнитного потока взаимно связаны между собой тем соотношением, которое существует между вращательным движением рукоятки штопора и поступательным движением его винта.*

Практически направление электрического тока в каждом частном случае легко определяется при помощи подвижной магнитной стрелки. Внося эту стрелку в область действия магнитного поля тока, т. е. приближая стрелку к проводнику, мы по ее направлению можем составить себе представление о направлении самого магнитного поля (фиг. 32). Затем, применяя правило штопора, нетрудно определить и направление тока.

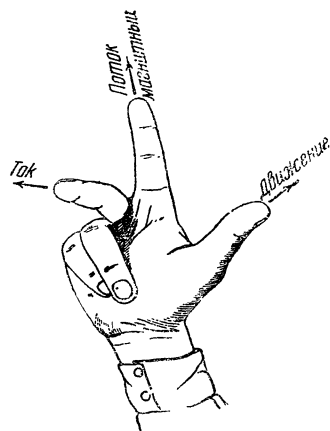
Что касается вопроса о том, как именно осуществляется течение электричества внутри проводника, сопровождающее и дополняющее возникновение магнитного поля вокруг проводника, то по этому поводу можно сказать следующее. В § 25 (гл. 2) уже было разъяснено, что внутри всякого металлического тела существует большое количество электронов, которые можно назвать свободными в том смысле, что каждый из них является временно освободившимся от тесной связи с каким-либо атомом. Эти электроны весьма подвижны и легко перемещаются в ту или иную сторону, в зависимости от направления внешних влияний электрического характера. Такого рода влияния электроны испытывают от электрического поля, которое, как мы указывали в предыдущем параграфе, обычно сопровождает магнитное поле тока. Вследствие существования указанного электрического поля электроны движутся вдоль проводника. Положительное же электричество, связанное внутри металла с сравнительно очень тяже-

лыми частицами вещества, мало подвижно. Таким образом, надо полагать, что движение электричества внутри металлического проводника практически состоит лишь в перемещении электронов, т. е. отрицательного электричества. В то же время необходимо иметь в виду, что основное условие относительно направления тока (правило штопора) было уже давно установлено в предположении, что при прохождении тока по проводнику вдоль него течет как раз положительное электричество. Следовательно, при прохождении тока действительное движение носителей электричества (отрицательного) совершается в металлическом проводнике в сторону, обратную той, которая условно принята за направление электрического тока в данном проводнике. Но это обстоятельство нисколько не мешает нам в целом ряде случаев ради простоты рассуждать так, как будто бы при прохождении тока движется только положительное электричество в направлении тока. Об этом мы уже, по существу, говорили в § 18 гл. 2 (фиг. 6). В случае неметаллических проводящих веществ, например водных растворов солей и кислот, с достоверностью известно, что прохождение электрического тока через них сопровождается движением как отрицательного, так и положительного электричества в противоположных, конечно, направлениях. При этом оказывается, что оба электричества связаны, вообще говоря, с группами атомов, образовавшимися вследствие распада частиц солей или кислот, растворенных в воде. Эти заряженные положительно и отрицательно группы атомов принято называть и о́ н а м и¹. До некоторой степени подобные же тяжелые ионы принимают участие и в прохождении электрического тока через газы и пары, в обычном своем состоянии являющиеся хорошими изоляторами, но в некоторых особых условиях становящиеся проводниками. При этом кроме газовых ионов в качестве носителей электричества, проходящего через газы и пары, оказываются еще и свободные электроны, которые отделились от нейтральных, т. е. незаряженных, частиц вещества.

В гл. 2, посвященной основным электрическим явлениям, мы неоднократно имели случай говорить о перемещении электричества от одного тела к другому или от одной части некоторого тела к другой части его. Во всех этих случаях речь, по существу, шла об электрическом токе. *Всякое движение электричества сопровождается возникновением магнитного поля вокруг пути этого передвижения и носит все признаки электрического тока.* Отсюда происходят различные возможности для получения тока помимо явления электромагнитной индукции. Вкратце мы этого коснемся в следующем параграфе.

¹ По-гречески «и́он» значит «идущее», «передвигающееся».

В заключение настоящего параграфа остановимся еще на вопросе о направлении электрического тока, возбуждаемого благодаря электромагнитной индукции. Подробно обследуя общие условия возникновения индуктированного тока (фиг. 27), мы убеждаемся в том, что направление этого тока находится в строго определенном соотношении с направлением внешнего магнитного потока, пересекаемого проводником, и с направлением движения проводника. Это соотношение обычно выражается в виде особых правил, позволяющих в каждом частном случае просто определить направление индуктированного тока. Одним из наиболее удобных является так называемое **правило правой руки**. Для того чтобы применить это правило, необходимо прежде всего расположить три первых пальца правой руки (большой, указательный и средний) так, чтобы каждый из них был направлен поперек двух других (фиг. 33), т. е. взаимно перпендикулярно. Затем надо поступить следующим образом:



Фиг. 33. Правило правой руки.

Большой (первый) палец направляют в сторону движения проводника, указательный (второй) — вдоль пересекаемого магнитного потока; тогда средний (третий) палец определит направление индуктированного тока.

При применении правила правой руки полезно помнить, что три основных направления — Движения, Потока и Тока — располагаются в алфавитном порядке (*Д*, *П*, *Т*) вдоль первого, второго и третьего пальцев.

Необходимо подчеркнуть следующее важное обстоятельство. При применении правила правой руки предполагается, что пересекаемый проводником магнитный поток неподвижен, а движется только проводник. Однако, на практике встречаются случаи, когда проводник неподвижен, перемещается же магнитный поток. В таких случаях при пользовании правилом правой руки необходимо рассуждать так, как будто бы магнитный поток остается неподвижным, а проводник движется в направлении, прямо противоположном действительному движению потока. Результат от этого несколько не изменяется. Вообще движение проводника, пересекающего магнитный поток в некотором определенном направлении, совершенно равноценно движению самого потока в противоположном направлении.

38. ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

В следующей главе (5) мы подробно ознакомимся с устройством наиболее употребительных современных источников (генераторов) электрического тока. В настоящем же параграфе мы ограничимся лишь общим обзором главнейших способов получения тока, имеющих или могущих иметь какое-либо практическое значение.

Как мы упоминали выше (§ 36), в настоящее время особенно большое значение имеют генераторы, основанные на явлении электромагнитной индукции, т. е. так называемые электромагнитные генераторы. В своем первоначальном простейшем виде подобное устройство представлено в левой части фиг. 27 и состоит из некоторого проводника, который при своем движении может пересекать магнитный поток, создаваемый соответствующим магнитом. При помощи подобного устройства мы не в состоянии непрерывно поддерживать в цепи электрический ток одного и того же направления, т. е. так называемый постоянный ток. Это объясняется тем, что никакими средствами невозможно создать такое движение данного проводника во внешнем магнитном поле, чтобы он, неизменно входя в состав электрической цепи, сколь угодно долго пересекал магнитные линии этого поля в одном и том же направлении. Из рассмотрения фиг. 27 мы отчетливо видим, что при движении проводника AB поперек магнитных линий (скажем, слева направо) ток в нем будет индуцироваться в одном направлении, именно от A к B (см. правило штопора), до тех пор, пока происходит рассматриваемое пересечение магнитных линий. Но как только проводник выйдет из области, занимаемой потоком магнита NS , пересечение магнитных линий не будет больше иметь места, и индуцированный ток в цепи прекратится. Для того чтобы вновь возбудить ток, необходимо изменить направление движения проводника и, перемещая его справа налево, вновь начать пересекать магнитные линии. Однако, теперь в нем будет индуцироваться ток обратного направления, именно от B к A . Таким образом, попеременно двигая проводник AB то в одну, то в другую сторону, мы будем возбуждать в электрической цепи токи переменного направления или, как обыкновенно говорят, переменный ток. Ясно, конечно, что в рассматриваемом опыте мы могли бы, сохраняя проводник AB неподвижным, соответственным образом передвигать магнит NS , то в одну, то в другую сторону. От этого суть дела несколько не изменится, если только попрежнему будет происходить пересечение магнитных линий.

Практически, в специальных машинах, служащих для возбуждения электрического тока при помощи электромагнит-

ной индукции, попеременное движение проводника в разные стороны заменяется непрерывным вращением его вокруг некоторой оси так, чтобы осуществлялось необходимое пересечение магнитных линий. Во многих случаях бывает выгоднее, оставляя проводник (более или менее сложной формы) неподвижным, перемещать около него полюсы магнита или группы магнитов, причем это перемещение опять-таки производится путем непрерывного вращения магнитов, надлежащим образом закрепленных на валу машины. Именно таким образом строятся современные генераторы переменного тока, широко применяемые на практике вследствие ряда преимуществ при передаче и распределении электрической энергии по сравнению с постоянным током (см. § 57 гл. 6).

Для генерирования постоянного тока, который также находит себе практическое применение в ряде случаев, обычно двигают проводники в неподвижном магнитном поле, и при этом необходимо прибегать к особым вспомогательным приспособлениям. Они имеют целью последовательно переключать места присоединения подвижных проводников, пересекающих магнитные линии, к проводам внешней цепи, которые подводят возбуждаемый ток к различным приемникам. Таким образом удается достигнуть того, чтобы по внешней части электрической цепи все время протекал ток неизменного направления (см. § 54, гл. 5).

Электромагнитные генераторы обычно приводятся во вращение тепловыми или гидравлическими двигателями, вместе с которыми они составляют основную часть устройства всякой электрической станции. Нередко эти генераторы называются *динамоэлектрическими машинами*, или просто *динамомашинами*, или же, наконец, более сокращенно — *динамо*¹. Особенно часто это наименование применяется для машин постоянного тока.

На втором после электромагнитных генераторов месте в современных условиях стоят источники электрического тока, впервые построенные Вольтой и по существу основанные на использовании химической энергии. Это — так называемые *гальванические*² *элементы* и в общем подобные им

¹ От греческого слова «динамис», что значит «сила». Здесь имеется в виду, что данная машина превращает в электрическую энергию работу, производимую механической силой первичного двигателя.

² Гальвани (1737—1798)—знаменитый итальянский ученый (анатом и физиолог). Гальвани открыл явление электрического тока, которое встарины было названо «гальваническим электричеством», но неправильно истолковал свое открытие. Вольта дал правильное объяснение и на основании его построил первый удобный для применения источник электрического тока—так называемый «вольтов столб», от которого произошли гальванические (или вольтанические) элементы.

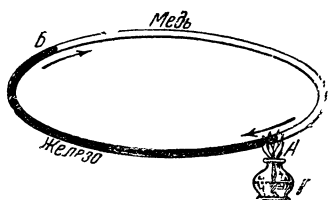
вторичные элементы или аккумуляторы¹. Для того чтобы подробнее познакомиться с явлениями, которые происходят в элементах, нам необходимо будет предварительно коснуться вопроса о химических действиях электрического тока, что мы и сделаем дальше, в § 43. Здесь же ограничимся указанием, что подобного рода источники тока обычно состоят из двух различающихся по своим свойствам проводящих пластин или стержней (например, из цинка и меди или из цинка и твердого угля и т. п.), погруженных в раствор серной кислоты или специально подобранных солей. Металлические или угольные пластины и стержни, входящие в состав элемента, принято называть его электродами². Следствие различия в характере химических взаимодействий обоих электродов с раствором, в который они погружены, между ними образуется разность электрических потенциалов. Один из электродов оказывается заряженным положительным электричеством, другой — отрицательным. Цинк в гальванических элементах обычно является отрицательным электродом. Ясно, конечно, что при соединении электродов элемента какой-либо проволокой по ней пойдет электрический ток в направлении от положительного электрода к отрицательному. И этот ток неизменного направления будет продолжаться все время, пока химические реакции в данном элементе будут поддерживать разность потенциалов между его электродами. Таким образом электрические элементы оказываются весьма пригодными для того, чтобы возбуждать и поддерживать постоянный ток в некоторой цепи. Однако, стоимость электрической энергии, получаемой от элементов, оказывается значительно выше, чем в случае электромагнитных генераторов. Поэтому в современном электроэнергетическом хозяйстве эти элементы практически не играют почти никакой роли. Область их применения ограничивается главным образом электрической сигнализацией и электросвязью (электрические звонки, телеграф, телефон и т. п.), когда стоимость электрической энергии отступает на второй план перед разного рода другими эксплуатационными расходами. Кроме того электрические элементы применяются как вспомогательные источники тока, а также в некоторых случаях, когда необходимо иметь сравнительно легкие переносные источники тока, например, для карманных фонарей, рудничных ламп и т. п.

В источниках постоянного тока, предназначенных для присоединения к внешней цепи, принято называть полюсами те

¹ Латинское слово «аккумулятор» значит «собирающий», «накапливающий».

² См. примечание в конце § 23. Электродом вообще называют твердый проводник, помещаемый в жидкую или газообразную среду и служащий для введения тока в эту среду или для вывода тока из нее.

наружные выводы, или зажимы, через посредство которых данный источник включается в цепь. Так как эти полюсы всегда бывают заряжены положительным или отрицательным электричеством, то весьма часто говорят о положительном полюсе и об отрицательном полюсе источника постоянного тока.



Фиг. 34. Цепь термоэлектрического тока.

В § 22 гл. 2 было вкратце рассмотрено устройство электрофорных электрических машин, обычно служащих для генерирования электрических зарядов при большой разности потенциалов между ними. Ясно, конечно, что при соединении положительного и отрицательного полюсов электрофорной машины каким-либо проводом мы получим в нем электрический ток. Таким образом подобного рода машина может служить в качестве генератора постоянного тока. Область применения таких генераторов до сих пор была весьма ограничена. Однако, в последнее время, в связи с вопросом о передаче электрической энергии на очень большие расстояния при помощи постоянного тока, вновь начали усиленно разрабатывать электрические генераторы по типу электрофорных машин, и при этом были получены более или менее благоприятные результаты в смысле выяснения возможности построения больших генераторов этого рода. Будущее покажет, насколько целесообразно устройство таких машин.

В заключение настоящего краткого обзора упомянем еще о так называемых термоэлементах¹, в которых электрический ток получается непосредственно за счет тепловой энергии. Опыт показывает, что в замкнутой цепи, составленной из разнородных металлических проводников, возникает ток, если только температуры мест соединения этих проводников, или, как говорят, температуры спаев, неодинаковы. Такой ток принято называть термоэлектрическим током. Возникновение этого тока находится в тесной связи с открытым Вольтой явлением электризации при соприкосновении.

Рассмотрим какой-либо простейший термоэлемент. Представим себе замкнутую цепь (фиг. 34), составленную, например, из меди и железа. Пока места спаев *A* и *B* находятся при одной и той же температуре, никакого тока в цепи не наблюдается. Благодаря соприкосновению меди и железа происходит только их электризация, причем медь электризуется отрицательно, а железо — положительно. Происходит это,

¹ По-гречески «тёрмос» значит «теплый».

надо полагать, оттого, что свободные электроны, всегда находящиеся в металле, сильнее стремятся перейти с железа на медь, чем в обратном направлении. В случае одинаковой температуры спаев *A* и *B* такое стремление электронов перейти с одного металла на другой будет одинаково в местах обоих спаев. В случае же, если мы нагреем один из спаев (скажем, *A*) при помощи, например, какой-либо горелки *G* (фиг. 34), то в этом месте электроны начнут более сильно стремиться переходить с железа в медь, чем в холодном спае *B*. Таким образом бывшее до того электрическое равновесие нарушится и в рассматриваемой цепи возникнет ток в направлении от меди к железу через горячий спай *A*. Этот термоэлектрический ток будет продолжаться до тех пор, пока поддерживается разность температур между спаями *A* и *B*.

Ввиду сравнительно малой экономичности термоэлементов они в настоящее время практически не применяются в качестве именно источников электрической энергии. Их используют, однако, для некоторых специальных целей. Между прочим при помощи надлежащим образом устроенных термоэлементов во многих случаях можно весьма удобно измерять температуру. Подобрав подходящие металлы и поддерживая температуру одного из спаев неизменной, помещают другой спай, например, в печь, температуру которой необходимо измерить. При этом в электрическую цепь термоэлемента вводят соответствующий измерительный прибор, который позволяет судить о характере тока и дает таким образом возможность определить искомую температуру.

В дальнейшем, при изложении этой главы, за исключением случаев, когда будут сделаны специальные оговорки, мы обычно будем иметь в виду постоянный ток, или, точнее сказать, ток неизменного направления.

39. СИЛА ТОКА, ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. АМПЕР, ВОЛЬТ, ОМ

При количественном обследовании свойств электрического тока и законов, которым он подчиняется, необходимо прежде всего установить, какими величинами мы будем пользоваться для точного описания различных его проявлений.

Опыт, рассмотренный нами в § 36 (фиг. 27), показывает, что механические силы, с которыми ток действует на магнитную стрелку, и, следовательно, угол отклонения ее от начального положения, могут быть различны в зависимости от разных обстоятельств, например, от скорости пересечения магнитных линий проводником. Другими словами, сила магнитного поля, которое всегда наблюдается близ проводника с током, не есть величина неизменная. Она, очевидно, зависит от

некоторого свойства данного электрического тока. Самое естественное предположение, какое только можно сделать, это то, что магнитная сила зависит от степени возбуждения рассматриваемого сложного явления, или, как принято говорить, от с и л ы т о к а. Мы должны допустить, что усиление магнитного поля тока свидетельствует об усилении самого тока и, наоборот, более слабому магнитному полю тока соответствует меньшая сила тока. Так как магнитное поле тока не есть какой-либо отдаленный результат действия электрического тока, но представляет собой основную часть изучаемого явления, то, очевидно, силу этого магнитного поля в некоторой точке мы должны считать прямо связанной с силой тока. Таким образом судить о силе тока мы можем непосредственно по силе его магнитного поля, что практически сводится к наблюдению механических сил, с которыми ток действует на магнитную стрелку, т. е. к наблюдению сил взаимодействия тока и магнита или, вообще говоря, тока и внешнего магнитного поля (см. § 46). Именно исходя из этих взаимодействий была установлена для практических целей е д и н и ц а с и л ы т о к а, на основании международного соглашения названная а м п ё р о м, в честь французского ученого Ампера¹. В виде примера можно указать, что обычные электрические лампочки потребляют ток, сила которого в зависимости от развиваемого ими количества света, колеблется в пределах от долей ампера до одного ампера и несколько выше. В разного рода электродвигателях, применяемых в промышленности, сила тока достигает до десятков, сотен и даже тысяч амперов.

Одна тысячная доля ампера называется м и л л и а м п ё р о м, а одна миллионная ампера — м и к р о а м п ё р о м².

В § 36 мы указывали, что явление электрического тока вдоль проволоки сопровождается движением электричества внутри данного проводника. При этом, следовательно, через поперечное сечение проводника протекает электричество. Ясно, конечно, что это протекание электричества будет происходить с большей или меньшей скоростью, в зависимости от силы тока. Таким образом сила тока может быть измеряема также скоростью протекания электричества через поперечное сечение проводника, т. е. количеством электричества, протекающего в единицу времени, например, в одну секунду. Количество электричества, протекающего через поперечное сечение проводника в 1 секунду, при силе тока в 1 ампер, принято называть а м п ё р - с е к у н д о й или к у л о н о м (в честь французского ученого Кулона). Иногда пользуются единицей

¹ Ампер (1775—1836)—французский физик и математик, известный в истории учения об электрических и магнитных явлениях своими многочисленными исследованиями и теоретическими обобщениями.

² См. последние примечания к § 19.

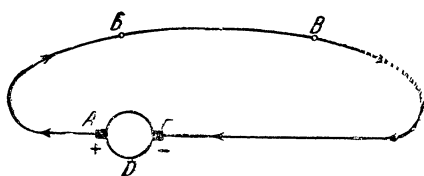
количества электричества значительно большей, именно так называемым ампер-часом, который равен количеству электричества, протекающего через поперечное сечение проводника в течение 1 часа при силе тока в 1 ампер. Само собой разумеется, что 1 ампер-час равен $60 \times 60 = 3\,600$ ампер-секунд, или кулонов. Вообще количество протекшего по цепи электричества равно произведению силы тока на время, в течение которого это электричество протекло.

Говоря о силе тока, мы имеем в виду свойство тока, которое присуще любому участку электрической цепи. По всей цепи протекает ток, во всяком месте цепи ток имеет некоторую совершенно определенную силу. Есть, однако, такое свойство цепи электрического тока, которое обычно должно быть относимо нами лишь к какой-нибудь одной части цепи. Именно, если мы обратимся к вопросу о причине, возбуждающей ток, то не подлежит никакому сомнению, что мы должны отнести ее к тому месту цепи, где происходит основное явление, при наличии которого по данной цепи идет электрический ток, а по прекращении которого немедленно прекращается и ток, хотя бы цепь оставалась вполне замкнутой. Эту причину тока, причину движения электричества вдоль цепи, принято называть электродвижущей силой (э. д. с.).

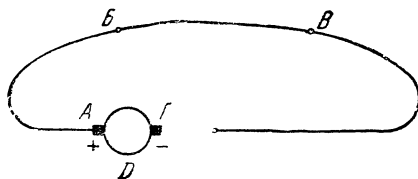
За направление электродвижущей силы принимается направление тока, возбуждаемого в некоторой цепи этой электродвижущей силой.

В случае электромагнитной индукции тока электродвижущая сила появляется в том месте цепи, где происходит пересечение магнитных линий проводником. Эта индуцированная электродвижущая сила имеет место, следовательно, в каждом электромагнитном генераторе тока. Электродвижущей силой обладает всякий гальванический элемент, а также вторичный элемент или аккумулятор. Так называемая термоэлектродвижущая сила существует в каждом термоэлементе.

Для измерения величины электродвижущей силы принята та же единица, что и для измерения разности потенциалов, или напряжения, т. е. вольт (см. § 19, гл. 2). Дело в том, что разность потенциалов между какими-либо двумя заряженными телами по существу является именно той электродвижущей силой, которая стремится перемещать электричество от одного тела к другому и которая возбуждает ток в проволоке, если мы соединим ею данные тела. Оказывается, далее, что во всякой обычной электрической цепи, по которой протекает ток, наблюдается совершенно определенная разность потенциалов, т. е. электрическое напряжение, между любыми двумя точками проводника цепи. На фиг. 35 пред-



Фиг. 35. Замкнутая цепь динамомашинны.



Фиг. 36. Разомкнутая цепь динамомашинны.

ставлена замкнутая цепь, в которой возбуждается постоянный ток, например, от динамомашинны D ¹. Буквами A и Γ обозначены внешние зажимы динамомашинны, т. е. зажимы, к которым присоединяются концы проводника, образующего внешнюю цепь. Зажим A отмечен знаком $+$, а зажим Γ знаком $-$. Иными словами, мы в данном случае предполагаем, что ток во внешней цепи течет в направлении от A к Γ . Опыт показывает, как было отмечено выше, что электрические состояния (потенциалы) отдельных точек цепи тока обычно бывают неодинаковы. Следовательно, разность потенциалов между точками A и B , B и B , B и Γ не равна нулю. При этом потенциал точки, от которой идет ток, выше потенциала точки, к которой направляется ток. Наибольшая разность потенциалов (напряжение) во внешней цепи будет между точками A и Γ , и она равна сумме отдельных разностей потенциалов между всеми произвольными парами точек, последовательно расположенными вдоль внешней цепи. Поэтому принято говорить: разность потенциалов между началом и концом внешней электрической цепи равна полному падению потенциала (падению напряжения) вдоль всей этой цепи. Что касается причины возникновения рассматриваемых разностей потенциалов, то, очевидно, этой причиной является основная электродвижущая сила, генерируемая в динамомашине D . Если электрическая цепь динамомашинны D будет прервана, т. е. разомкнута (фиг. 36), то по цепи не будет протекать никакого тока, но разность потенциалов между точками A и Γ будет существовать, и в этом случае она в точности соответствует э. д. с. динамомашинны D . Принимая одну и ту же единицу (вольт) для измерения как разностей потенциалов, так и э. д. с., мы, следовательно, можем сказать, что при условии разомкнутости цепи любого генератора электрической энергии, его э. д. с. в точности равна разности потенциалов, т. е. напряжению, между его внешними зажимами. Таким образом, измеряя разность потенциалов (электрическое напряжение) между зажимами генератора, внешняя цепь

¹ На фиг. 35 дано условное изображение динамомашинны постоянного тока.

которого разомкнута, мы можем определить его э. д. с. Сказанное относится не только к электромагнитным генераторам тока, но и ко всем вообще источникам электрического тока, в частности — к гальваническим элементам, аккумуляторам и т. д.

Опыт показывает, что при одной и той же неизменной э. д. с. в цепи и даже при одной и той же неизменной длине и толщине проволоки, из которой составлена данная цепь, сила тока весьма зависит от вещества проводника. Так, например, в случае медной проволоки, обычно применяемой для электрической проводки, сила тока при прочих равных условиях будет значительно больше, чем в случае такой же по размерам свинцовой или железной проволоки. Таким образом в зависимости только от свойств проводника электрический ток может быть сильнее или слабее; другими словами, всякий проводник обладает некоторым качеством, которое позволяет явлению электрического тока развиваться в большей или меньшей степени. Обыкновенно принято говорить в данном случае об электрическом сопротивлении проводника. Наименование «сопротивление» особенно уместно при описании явления электрического тока, так как это явление представляет собой некоторое сложное движение, в котором проводник играет роль своего рода направляющей (см. § 36), а мы знаем, что в любом движении, совершающемся вдоль какой-либо направляющей (вдоль каких-либо, так сказать, рельсов), эта направляющая обычно оказывает большее или меньшее сопротивление происходящему вдоль нее движению.

Итак, всякий проводник, всякая электрическая цепь обладает электрическим сопротивлением. Это есть свойство цепи, имеющее определенную величину, совершенно независимо от того, идет ли по цепи ток или не идет. Если в каком-либо месте данной замкнутой цепи возникнет по той или иной причине э. д. с., то по цепи начнет протекать электрический ток, сила которого будет зависеть от величины электрического сопротивления этой цепи, слагающегося из сопротивлений всех отдельных участков проводника, входящих в состав цепи.

Для измерения электрического сопротивления применяется единица, которой на основании международного соглашения дано наименование ом, в честь немецкого ученого Ома¹. В виде примера можно указать, что электрическим сопротивлением в 1 ом обладает медная проволока, имеющая поперечное сечение в 1 квадратный миллиметр и длину в 57 метров.

¹ Ом (1787—1854)—известный немецкий физик. Сын слесаря, Ом не имел возможности окончить высшую школу. Долгое время был учителем средней школы. Одновременно он занимался исследованиями в области электрического тока и открыл закон, названный его именем (см. следующий параграф).

Алюминиевой проволоки такого же поперечного сечения требуется около 35 метров для получения сопротивления в 1 ом. Наконец, в случае железной проволоки с поперечным сечением в 1 квадратный миллиметр сопротивление в 1 ом достигается при длине ее всего около 8 метров. Эти данные являются лишь приблизительными, так как электрическое сопротивление проволоки зависит от чистоты металла. Кроме того электрическое сопротивление проводников зависит от их температуры и для металлических проводников обычно увеличивается с повышением температуры. Один миллион омов называется мегомом¹.

В тех случаях, когда требуется проводник с большим электрическим сопротивлением, для изготовления проволоки применяют особые сплавы различных металлов. Надлежащим подбором входящих в состав сплава металлов удается получить проволоку, на 1 метр которой при сечении в 1 квадратный миллиметр сопротивление достигает 1 ома и выше. Такими свойствами обладает, например, так называемый *нихром* (сплав никеля, хрома и железа). В случае сплава, называемого *манганином* (медь, марганец, никель и следы железа), сопротивление примерно в два раза меньше.

Ясно, конечно, что *электрическое сопротивление какой-либо проволоки будет тем больше, чем больше ее длина и чем меньше ее поперечное сечение.*

40. ЗАКОН ОМА

Скорость всякого движения увеличивается по мере увеличения сил, которые своим действием производят это движение, и по мере уменьшения сопротивления, оказываемого этому движению средой или теми направляющими, вдоль которых совершается данное движение. Эти соображения полностью применимы и к тому сложному движению электромагнитного характера, которое мы называем электрическим током. В точном соответствии с тем, что происходит в действительности, мы можем сказать, что сила тока в некоторой замкнутой цепи тем больше, чем больше действующая в этой цепи электродвижущая сила и чем меньше электрическое сопротивление цепи. Указанные в предыдущем параграфе единицы силы тока, электродвижущей силы и электрического сопротивления (ампер, вольт и ом) подобраны так, что сила тока в 1 ампер получается в цепи с сопротивлением в 1 ом

¹ Приставка «мега», которая принята для обозначения величины, в миллион раз большей, чем основная величина, происходит от греческого слова «мега́лос», что значит «очень большой».

при действии э. д. с. в 1 вольт. Мы можем, следовательно, написать

$$1 \text{ ампер} = \frac{1 \text{ вольт}}{1 \text{ ом}}.$$

Вообще мы имеем следующее основное соотношение:

$$\text{сила тока в амперах} = \frac{\text{электродвижущая сила в вольтах}}{\text{электрическое сопротивление в омах}}.$$

Иными словами, для получения силы тока, выраженной в амперах, мы должны действующую в данной замкнутой цепи э. д. с., измеренную в вольтах, разделить на электрическое сопротивление цепи, измеренное в омах. Например, если в некоторой замкнутой цепи действует э. д. с., равная 100 вольтам, и полное электрическое сопротивление цепи равно 20 омам, то мы получим силу тока, равную 5 амперам:

$$\text{сила тока} = \frac{100 \text{ вольт}}{20 \text{ омов}} = 5 \text{ амперам}.$$

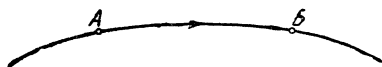
Рассмотренная зависимость между силой тока, э. д. с. и электрическим сопротивлением была установлена Омом, который в своих исследованиях исходил из некоторого подобия, существующего между электрическим током и распространением теплоты. По имени этого ученого указанное соотношение называется **з а к о н о м О м а**.

Для проверки справедливости этого закона было сделано очень много весьма тщательно проведенных опытов над токами в твердых и жидких проводниках. Несмотря на то, что к точности измерений при этих опытах были предъявлены самые строгие требования, ни одного исключения из закона Ома обнаружено не было. При этом всегда сопротивление проводника оказывается тем больше, чем больше его длина и чем меньше его поперечное сечение.

Закон Ома имеет очень большое значение в области электротехники. Пользуясь законом Ома и рядом следствий, из него вытекающих, мы легко можем производить разного рода расчеты, необходимые для того, чтобы целесообразно подобрать отдельные части электрической цепи. Это имеет особенное значение для правильного выбора проводов, при помощи которых электрическая энергия подается от генератора к приемникам.

Выше, при изложении закона Ома, мы имели в виду замкнутую цепь электрического тока всю полностью. Чрезвычайно важно то обстоятельство, что закон Ома применим и к каждому отдельному участку цепи. В простейшем случае, когда на данном участке цепи нет какого-либо источника э. д. с., ток, протекающий по этому участку от точки А к

точке Б (фиг. 37), мы должны рассматривать как результат действия на участке AB разности потенциалов (электрического напряжения) между точками A и B . В полном смысле слова это напряжение между точками A и B является внешней электродвижущей силой, действующей на участке AB , и представляет собой не что иное, как часть основной э. д. с., находящейся где-то в другой части замкнутой цепи тока, — ту часть ее, которая идет на преодоление электрического сопротивления провода на участке AB . В связи со сказанным мы можем так написать соотношение, выражающее закон Ома применительно к участку AB :



Фиг. 37. Отдельный участок цепи электрического тока.

$$\text{сила тока} = \frac{\text{разность потенциалов между точками } A \text{ и } B}{\text{электрическое сопротивление участка } AB}.$$

Если, например, разность потенциалов между точками A и B равно 10 вольтам, а электрическое сопротивление этого участка цепи равно 5 омам, то получающаяся при этих условиях сила тока равна, следовательно,

$$\frac{10 \text{ вольтов}}{5 \text{ омов}} = 2 \text{ ампера}.$$

Наоборот, зная силу тока и сопротивление участка цепи AB и пользуясь законом Ома, нетрудно определить разность потенциалов между точками A и B . Задача сводится к тому, чтобы подыскать такое значение разности потенциалов, при делении которого на известное нам сопротивление мы могли бы получить заданную силу тока. Совершенно очевидно, что для нахождения искомой разности потенциалов, или, как иногда говорят, падения напряжения на участке AB , необходимо перемножить соответствующие величины сопротивления и силы тока. Следовательно, мы можем написать:

$$\begin{aligned} \text{разность потенциалов между точками } A \text{ и } B &= \\ &= \text{падение напряжения на участке } AB = \\ &= \text{сопротивление участка } AB \times \text{сила тока}. \end{aligned}$$

Применительно к только что разобранным численным примерам мы можем написать:

$$\begin{aligned} \text{падение напряжения на участке } AB &= \\ &= 5 \text{ омов} \times 2 \text{ ампера} = 10 \text{ вольтов}. \end{aligned}$$

Закон Ома может быть использован также для нахождения величины сопротивления некоторого участка цепи по

заданным силе тока и падению напряжения вдоль данного участка.

Совершенно очевидно, что имеет место следующее соотношение:

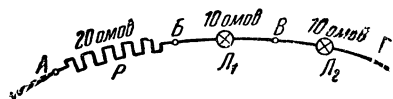
$$\text{сопротивление} = \frac{\text{падение напряжения}}{\text{сила тока}}.$$

Опять возвращаясь к рассматриваемому численному примеру, получаем:

$$\text{сопротивление участка цепи } AB = \frac{10 \text{ вольтов}}{2 \text{ ампера}} = 5 \text{ омов}.$$

41. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

В состав всякой электрической цепи, вообще говоря, входят различные части. Если эти части соединены между собой таким образом, что один и тот же электрический ток последовательно проходит через все



Фиг. 38. Последовательное соединение трех участков цепи.

последовательно проходит через все части цепи, то такое их соединение называется последовательным. Пример подобного последовательного соединения представлен на фиг. 38, где изображено последователь-

ное соединение следующих трех участков цепи: некоторого участка AB , обозначенного буквой P и имеющего сопротивление, допустим, в 20 омов; лампы накаливания L_1 , условно изображенной кружком с крестиком и имеющей сопротивление в 10 омов, такой же второй лампы накаливания L_2 на участке BC . Полное сопротивление цепи между точками A и G равно сумме сопротивлений отдельных последовательно соединенных участков (в омах):

$$20 + 10 + 10 = 40 \text{ омов}.$$

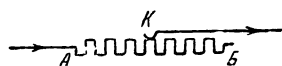
Если напряжение между точками A и G равно, например, 20 вольтам, то сила тока, протекающего по этим трем последовательно соединенным участкам, будет равна согласно закону Ома

$$\frac{20 \text{ вольтов}}{(20 + 10 + 10) \text{ омов}} = \frac{20 \text{ вольтов}}{40 \text{ омов}} = 1/2 \text{ ампера}.$$

Сопротивление участка AB условно изображено ломаной линией. Так обычно изображают на электрических схемах¹

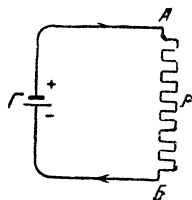
¹ Греческое слово «схема» значит «образ», «вид». Этим словом принято называть условное изображение способа соединения отдельных частей какого-либо устройства и, в частности, изображение способа соединения отдельных частей более или менее сложной электрической цепи.

так называемые реостаты¹, очень часто применяемые в электротехнической практике, когда по тем или иным соображениям необходимо сосредоточить в сравнительно небольшом объеме некоторое электрическое сопротивление. В простейших случаях для приготовления реостата свивают в виде спирали железную, нихромовую, манганиновую и тому подобную проволоку и закрепляют концы полученной спирали на каких-либо изолирующих подставках. В более сложных реостатах собирают на общей раме несколько подобных проволочных спиралей, соединенных последовательно, и при помощи какого-либо приспособления включают в электрическую цепь большее или меньшее число спиралей реостата, смотря по тому, какое добавочное сопротивление требуется ввести в цепь. Иногда, с целью придания большей механической прочности виткам проволочной спирали, навивают проволоку на какую-либо основу из изолирующего материала так, чтобы при этом, конечно, отдельные витки проволоки не соприкасались друг с другом. Такого рода реостат обычно снабжают так называемым скользящим контактом, представляющим собой некоторую упругую металлическую часть, которая прижимается к виткам проволоки и может быть передвигается вдоль реостата. На фиг. 39 представлена схема реостата со скользящим контактом. Здесь AB изображает витки проволоки, намотанной на изолирующей основе, K — скользящий контакт, могущий передвигаться вдоль реостата. Для включения такого реостата в электрическую цепь один провод присоединяют к зажиму A , а другой провод — к зажиму, связанному со скользящим контактом K . В зависимости от положения контакта K в цепь вводится большая или меньшая часть сопротивления реостата.



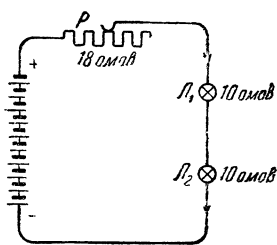
Фиг. 39. Схема реостата со скользящим контактом.

Полное сопротивление некоторой замкнутой цепи складывается из сопротивлений всех последовательно включенных отдельных частей, входящих в состав данной цепи, считая в том числе и сопротивление источника электрической энергии, который возбуждает ток благодаря генерируемой в этом источнике э. д. с. На схеме, представленной на фиг. 40, P —



Фиг. 40. Замкнутая цепь с гальваническим элементом.

¹ Слово «реостат» происходит от греческих слов «рёо», что значит «теку», и «статос» — «стоящий», «неподвижный». Имеется в виду, что прибор, называемый реостатом, представляет собой устанавливаемое (заранее или во время работы) сопротивление, по которому течет электрический ток.



Фиг. 41 Замкнутая цепь аккумуляторной батареи, содержащая две последовательно соединенные лампы накаливания.

есть реостат, к зажимам которого *A* и *B* присоединены провода от гальванического элемента¹ *Г*. Если в виде примера допустим, что э. д. с. гальванического элемента равна 1 вольту, а электрическое сопротивление этого элемента равно $\frac{2}{16}$ ома, и если сверх того примем, что сопротивление реостата равно 9 омам, а общее сопротивление соединительных проволок равно $\frac{8}{16}$ ома, то сила тока в рассматриваемой замкнутой цепи получается на основании закона Ома следующим образом:

$$\text{сила тока} = \frac{1\text{ в}}{\left(\frac{2}{10} + 9 + \frac{8}{10}\right) \text{ ом}} = \frac{1\text{ в}}{10 \text{ ом}} = \frac{1}{10} \text{ а.}$$

Ввиду того что э. д. с. каждого отдельного гальванического элемента или аккумулятора сравнительно невелика (обычно не превышает 2 вольта), для получения в цепи достаточно большой полной э. д. с. соединяют элементы или аккумуляторы последовательно в группы, которые принято называть батареями². Каждая батарея элементов или аккумуляторов обыкновенно составляется таким образом, что положительный электрод одного элемента соединяется с отрицательным электродом второго элемента, положительный же электрод второго элемента — с отрицательным электродом третьего элемента и т. д. При таком соединении отдельные э. д. с. элементов или аккумуляторов направлены все в одну сторону, т. е. действие их в данной цепи складывается. Таким образом полная э. д. с. батареи равна э. д. с. одного элемента, умноженной на число последовательно соединенных в батарее одинаковых элементов. На фиг. 41 представлена схема электрической цепи, в которой последовательно соединены: батарея из 10 аккумуляторов, две лампы накаливания *L*₁ и *L*₂ и реостат *P* со скользящим контактом, установленным на 18 омов. Допустим, что лампы накаливания имеют сопротивление по 10 омов каждая, внутреннее сопро-

¹ Гальванические элементы, а также аккумуляторы, обычно изображаются на схемах условно так, как это показано на фиг. 40.

² Французское слово «баттерй» в данном случае употребляется для обозначения соединения одинаковых частей в одну группу. В военном деле батарейей называется соединение нескольких одинаковых пушек в одну группу. Вольта, впервые построивший электрическую батарею, соединял большое количество элементов последовательно. В простейшем виде такое устройство известно под названием «вольтова столба».

тивление каждого аккумулятора равно $1/10$ ома и сопротивление всех соединительных проводов равно 1 ому. Полагая, далее, что э. д. с. каждого аккумулятора, входящего в состав последовательно соединенной батареи, равна 2 вольтам, можем на основании закона Ома написать:

$$\begin{aligned} \text{сила тока} &= \frac{2 \times 10 \text{ вольтов}}{[(1/10 \times 10) + (10 \times 2) + 18 + 1] \text{ омов}} = \\ &= \frac{20 \text{ вольтов}}{40 \text{ омов}} = 1/2 \text{ ампера.} \end{aligned}$$

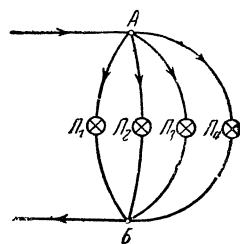
Что касается динамомашин, то их весьма редко соединяют последовательно, так как развиваемая в них э. д. с. обычно бывает достаточно велика, достигая в отдельных случаях нескольких тысяч вольт.

Кроме последовательного соединения отдельных частей цепи, весьма часто применяется параллельное¹ соединение, схема которого представлена на фиг. 42 в виде примера для случая четырех так называемых параллельных ветвей. На схеме изображены ветви, содержащие лампы накаливания L_1 , L_2 , L_3 и L_4 . Допустим, что все эти лампы тождественны и обладают сопротивлением в 200 омов каждая. Допустим также, что напряжение между точками А и Б, к которым присоединяются параллельные ветви, равно 100 вольтам. Электрический ток, проходящий по неразветвленной части цепи, разделяется в общей точке А на четыре части, соответственно числу параллельных ветвей, и далее, в точке Б, опять переходит в неразветвленную часть цепи. Ясно, что сила тока в неразветвленной части цепи складывается из сил токов во всех параллельных ветвях. Пренебрегая сопротивлением проводов, присоединяющих лампы к точкам А и Б, можем считать, что сопротивление каждой из ветвей равно 200 омам. В таком случае сила тока, проходящего через каждую из ламп, определится по закону Ома следующим образом:

$$\frac{100 \text{ вольтов}}{200 \text{ омов}} = 1/2 \text{ ампера.}$$

Сила же тока в неразветвленной части цепи будет равна:

$$\frac{1}{2} \text{ ампера} \times 4 = 2 \text{ ампера.}$$



Фиг. 42. Параллельное соединение четырех ветвей, содержащих лампы накаливания.

¹ Слово «параллельный» происходит от греческих слов «пара́», обозначающего «подле», «возле» и «аллэ́лой» — «друг друга», «взаимно».

Из этого результата с очевидностью вытекает, что полное сопротивление группы параллельно соединенных одинаковых ветвей во столько раз меньше сопротивления каждой отдельной ветви, сколько таких ветвей соединено параллельно. В только что рассмотренном примере параллельно соединено 4 ветви с сопротивлением в 200 омов каждая. Следовательно, эта группа четырех параллельных ветвей обладает полным сопротивлением

$$\frac{200 \text{ омов}}{4} = 50 \text{ омов},$$

и сила тока в неразветвленной части цепи равна

$$\frac{100 \text{ вольтов}}{50 \text{ омов}} = 2 \text{ ампера},$$

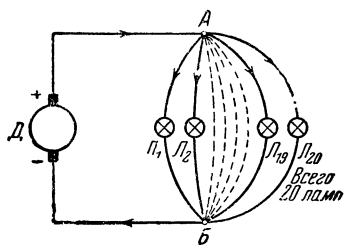
как это мы уже получили раньше, просто складывая силы токов в параллельно соединенных четырех ветвях.

В разобранным примере ради простоты допущено, что сопротивления всех параллельно соединенных ветвей равны между собой. Но существо дела не меняется в случае параллельного соединения сколь угодно большого числа ветвей с самыми различными электрическими сопротивлениями. Усложняются только расчеты. Пользуясь законом Ома и вытекающими из него следствиями, всегда можно совершенно точно решить задачу о распределении токов в сколь угодно сложной электрической цепи.

В практических условиях, в сложных цепях обычно одновременно встречается и последовательное и параллельное соединения отдельных частей этих цепей. Лампы накаливания, а также иные приемники электрической энергии в современных распределительных сетях¹ принято присоединять к источнику тока путем образования ряда параллельных ветвей, число которых равно числу приемников. Неразветвленными частями электрической цепи являются главные провода, которые подают ток от источника электрической энергии к месту присоединения ряда параллельных ветвей с приемниками. Таким образом сопротивление главных проводов оказывается включенным последовательно с группой параллельно соединенных приемников. На фиг. 43 представлена примерная схема подобного последовательно-параллельного соединения. Здесь *Д* есть динамомашина, питающая по двум проводам — *ДА* и *ДБ* — группу из 20 параллельно соединенных ламп накаливания. Допустим, что лампы все оди-

¹ Электрической сетью обыкновенно называют совокупность всех проводов, при помощи которых электрическая энергия передается от центральной станции и распределяется между всеми приемниками, питаемыми от данной станции.

наковые и что сопротивление каждой из параллельных ветвей, содержащих лампы, равно 200 омам. Предположим, кроме того, что сопротивление обоих проводов, ДА и ДБ, равно $\frac{9}{10}$ ома, а внутреннее сопротивление динамомашины Д равно $\frac{1}{10}$ ома. Наконец, допустим, что э. д. с. динамомашины равна 110 вольтам. При таких условиях сила тока, идущего по проводам ДА и ДБ, вычисляется на основании закона Ома следующим образом:



Фиг. 43. 20 ламп накаливания, параллельно присоединенных к цепи динамомашины.

$$\text{сила тока} = \frac{110 \text{ вольтов}}{\left(\frac{209}{20} + \frac{9}{10} + \frac{1}{10}\right) \text{ омов}} = \frac{110 \text{ вольтов}}{11 \text{ омов}} = 10 \text{ амперов.}$$

Весьма полезно несколько остановиться на этом примере сложной электрической цепи и рассмотреть, как именно расходуется э. д. с. в 110 вольт, генерируемая динамомашинной. Полное сопротивление группы из 20 параллельных ветвей, с сопротивлением каждой из них в 200 омов, будет согласно сказанному выше равно

$$\frac{200 \text{ омов}}{20} = 10 \text{ омов.}$$

При силе тока в 10 амперов разность потенциалов между точками А и В должна быть равна

$$10 \text{ омов} \times 10 \text{ амперов} = 100 \text{ вольтов.}$$

Падение напряжения в обоих проводах, ДА и ДБ, при их общем сопротивлении в $\frac{9}{10}$ ома будет равно

$$\frac{9}{10} \text{ ома} \times 10 \text{ амперов} = 9 \text{ вольтов,}$$

т. е. в каждом проводе падение напряжения составляет $4\frac{1}{2}$ вольта.

Наконец, для преодоления внутреннего сопротивления динамомашины Д, равного $\frac{1}{10}$ ома, потребуется при силе тока в 10 амперов

$$\frac{1}{10} \text{ ома} \times 10 \text{ амперов} = 1 \text{ вольт.}$$

Для получения величины напряжения между зажимами динамомашины, т. е. у начала проводов ДА и ДБ, необходимо

ст полной электродвижущей силы, генерируемой в динамомашиной и равной 110 вольтам, отнять 1 вольт, расходуемый на преодоление внутреннего сопротивления динамомашины. Получаем 109 вольт. Из них 9 вольт составляют падение напряжения в проводах *ДА* и *ДБ* (по $4\frac{1}{2}$ вольта на каждый из них). Остается, следовательно, напряжение в 100 вольт, действующее между точками *А* и *Б* и обуславливающее ток силой в 10 ампер, идущий через все 20 параллельно соединенных ламп (по $\frac{1}{2}$ ампера на каждую лампу)

Итак, мы видим, что в данном случае э. д. с. динамомашины разбивается на части, каждая из которых расходуется на преодоление отдельных последовательно включенных в данную цепь сопротивлений:

$$110 \text{ вольт} = 1 \text{ вольт} + 4\frac{1}{2} \text{ вольта} + 100 \text{ вольт} + 4\frac{1}{2} \text{ вольта}.$$

В рассмотренных примерах мы говорили только о параллельном соединении приемников электрической энергии. На практике весьма часто применяется также параллельное соединение генераторов, имеющих одинаковые э. д. с. Делается это обычно с целью получения возможно большей силы тока в цепи, питаемой от данной группы генераторов. Дело в том, что каждый из них рассчитывается и строится для таких условий работы, при которых он может развивать ток не сильнее некоторого определенного значения. Следовательно, для получения токов более сильных приходится соединять генераторы параллельно, так что каждый из них, так сказать, вливает во внешнюю цепь свою долю общего тока.

42. ТЕПЛОВЫЕ ДЕЙСТВИЯ ТОКА

Еще в § 12 (гл. 1) мы указывали, что электромагнитная энергия, движущаяся вдоль проволоки, по которой течет ток, отчасти проникает внутрь этой проволоки и здесь в конце концов превращается в тепло, нагревающее проволоку. Об этом же мы вкратце упоминали и в § 36. Вообще всегда, когда вдоль какой бы то ни было цепи, составленной из обычных проводящих частей, протекает электрический ток, проводники этой цепи *нагреваются*. Вещество проводников, несомненно, принимает участие в явлении, называемом нами электрическим током, что выражается между прочим зависимостью электрического сопротивления цепи от природы вещества, из которого изготовлены проводники. При этом обнаруживается основное свойство всякого вещества, всякой обычной материальной среды. Совершенно независимо от характера того или иного движения обычная материальная

среда, принимающая в нем участие, всегда поглощает всю или хотя бы часть энергии данного движения. Следствием этого бывает соответствующее увеличение количества тепла в тех телах, которые так или иначе оказываются причастными к движению. Одним из примеров проявления указанного общего закона природы служит и рассматриваемое теперь нагревание обычных проводников, по которым протекает электрический ток. В настоящее время не подлежит никакому сомнению, что внутри всякого проводника (твердого, жидкого или газообразного) при прохождении тока имеет место движение материальных носителей электричества. В металлах роль таких носителей играют электроны. Энергия движения этих носителей электричества получается за счет притекающей в проводник извне электромагнитной энергии и в конце концов распределяется между всеми материальными частицами, из которых состоит проводящее вещество. Частицы его благодаря этому приобретают увеличенные скорости движения, что соответствует увеличению тепловой энергии вещества и проявляется в повышении его температуры.

Количество тепла, образующегося в некотором участке цепи электрического тока, зависит от величины сопротивления данного участка, от силы проходящего по нему тока и от величины промежутка времени, в течение которого проходит ток. Количество выделяемого электрическим током тепла при неизменной силе тока оказывается во столько раз больше, во сколько раз больше электрическое сопротивление, а также во сколько раз продолжительнее промежуток времени действия тока. Так, например, при прочих равных условиях в случае сопротивления данного участка цепи, равного 5 омам, выделится в 5 раз больше тепла, чем в случае 1 ома. И совершенно очевидно, что при неизменных общих условиях в течение 10 минут электрический ток вызовет образование вдвое большего количества тепла, чем в 5 минут. Что же касается зависимости количества тепла от силы тока, то оказывается, что оно возрастает быстрее, чем увеличивается сила тока. Именно, при увеличении силы тока, например, в 2 раза количество тепла возрастет в $2 \times 2 = 4$ раза. Если сила тока увеличится в 10 раз, то количество выделяющегося тепла возрастет в $10 \times 10 = 100$ раз и т. д. Указанная зависимость количества выделяемого электрическим током тепла от общих условий, при которых это выделение тепла происходит, было впервые установлено Джбулем¹ и в связи с этим обычно называется законом Джбуля. По этой же причине весьма часто называют джбулевым теплом то тепло,

¹ Джбуль (1818—1889)—английский физик, основные работы которого относятся к области электрических явлений.

которое выделяется при нагревании проводников под действием электрического тока.

Образование джоулева тепла имеет чрезвычайно большое практическое значение. В целом ряде случаев это тепло применяется для тех или иных целей. Современная светотехника, использующая электрическую энергию для освещения, основана на накаливании электрическим током, т. е. на нагревании до высокой температуры соответственным образом подобранных проводников. Обычная лампа накаливания является простейшим примером подобного применения электрической энергии. В дальнейшем, в гл. 7, мы подробнее рассмотрим вопрос об электрическом освещении. На практике широко распространены электрические нагревательные устройства (см. гл. 9), специально приспособленные для применения в промышленности, в лабораторной практике, в домашнем быту и т. п.

Наконец, в качестве еще одного примера практического использования нагревания током упомянем о так называемых плавких предохранителях, представляющих собой сравнительно тонкие проволоки или металлические пластины, которые вводятся в цепь электрического тока с таким расчетом, чтобы они расплавились и прервали цепь, если сила тока по какой-либо причине превысит некоторый допустимый предел. Применение подобного рода плавких предохранителей весьма распространено в сетях распределения электрической энергии. Таким образом удается предотвращать чрезмерное нагревание проводов, могущее иметь опасные последствия в пожарном отношении.

То джоулево тепло, которое выделяется во всех проводах, передающих и распределяющих электрическую энергию от генераторов к приемникам, является бесполезной потерей энергии. Совершенно естественно, что с этими неизбежными потерями приходится на практике всемерно бороться. Это и делается путем надлежащего расчета проводов, который позволяет свести потери до некоторого допустимого предела (примерно от 5 до 10%).

43. ХИМИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ ТОКА. ЭЛЕКТРОЛИЗ. ЗАКОНЫ ФАРАДЕЯ. АККУМУЛЯТОРЫ И ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Прохождение электрического тока через некоторые твердые и жидкие тела, обычно называемые электролитами¹, сопровождается разного рода явлениями химического характера. Как показывает подробное изучение этих явлений,

¹ Слова «электролит» и «электролиз» образованы из греческого слова «электрон», от которого происходит слово «электричество» и из греческого же слова «люю», что значит «освобождаю», «разлагаю».

сущность их заключается в том, что электролиты, представляющие собой химически сложные вещества, разлагаются током на составные части. Описываемое явление разложения, называется э л е к т р о л и з о м. Специальные названия, относящиеся к этой области электрических явлений, были даны Фарадеем, который установил и количественные законы электролиза. Те проводящие тела, через посредство которых ток вступает в электролит и выходит из него, называются э л е к т р о д а м и. Тот электрод, через который ток входит в электролит, т. е. положительный электрод, называют а н о д о м¹, электрод же, через который ток выходит из электролита, т. е. отрицательный электрод, называют к а т о д о м². Составные части электролита, которые при прохождении тока движутся по направлению к электродам и выделяются на них, называются и о н а м и.

Как отмечено выше, электролитами могут быть твердые тела и жидкости. Иодистое серебро может служить примером твердого электролита, примерами жидких электролитов — водные растворы солей и кислот, а также расплавленные соли.

Опыт показывает, что освобождающиеся во время электролиза водород и металлы всегда выделяются на катоде. Вообще говоря, явления электролиза обычно более или менее осложняются благодаря тому, что выделяющиеся ионы нередко вступают в химическое взаимодействие с растворителем (водой) или с веществом электродов. Таким образом продукты электролиза не всегда оказываются первичными.

Явления электролиза объясняются тем, что каждая частица вещества, подвергающегося разложению, более или менее легко может распадаться на две части, одна из которых заряжена положительным электричеством, а другая — отрицательным. При этом оба заряда по величине равны между собой, и потому в обычных условиях неразложенная частица кажется нейтральной в электрическом отношении. Силы, связывающие эти отдельные части, представляют собой не что иное, как силы взаимодействия разнородно заряженных тел. В некоторых, однако, случаях и между прочим при растворении вещества в воде эти силы настолько ослабляются, что указанные отдельные части приобретают некоторую свободу: частицы, как говорят, д и с с о ц и и р у ю т. Благодаря д и с с о ц и а ц и и³, т. е. разделению нейтральных частиц на противоположно заряженные части, и образуются и о н ы — свободные носители электричества,

¹ По гречески «άνο» значит «вверх», а «οδος» значит «путь».

² По-гречески «κάτο» значит «вниз».

³ Латинское слово «диссоциацию» означает «разъединение».

играющие основную роль в явлении прохождения тока через электролиты. Главным признаком всякого электролита именно является наличие в нем диссоциировавших частиц, т. е. ионов. Количество ионов в электролите, непосредственно связанное с так называемой степенью диссоциации нейтральных частиц электролита, зависит от ряда обстоятельств: от количества соли или кислоты, растворенных в данном количестве воды, и т. д. Если теперь представим себе, что в подобный раствор со свободными ионами внесены электроды, присоединенные к зажимам электрического генератора, то электрическое поле, образовавшееся при этом между электродами, будет действовать чисто механически на свободные заряженные ионы. Положительные ионы начнут перемещаться по направлению к отрицательному электроду, т. е. к катоду, а отрицательные ионы — к аноду. Подойдя вплотную к соответствующим электродам, ионы и выделяются на них из электролита. Это движение ионов в электролите представляет, по видимому, сущность того, что происходит внутри данного проводника при прохождении через него электрического тока. Таким образом прохождение тока через электролит сопровождается переносом заряженных частиц в направлении тока (положительные ионы) и в обратном направлении (отрицательные ионы).

Рассмотрим в виде примера электролиз водного раствора медного купороса, представляющего собой медную соль серной кислоты. Каждая частица этой соли состоит из атома меди и группы атомов, являющейся основным началом серной кислоты. Вследствие диссоциации частиц медного купороса образуются положительные ионы (медные) и отрицательные ионы (сернокислотные). Допустим при этом, что анодом служит пластинка из платины или из золота, а катодом — пластинка из твердого угля. При прохождении тока через рассматриваемый электролит уголь будет покрываться слоем меди, образуемым отлагающимися на угольном катоде положительными медными ионами. Этот слой, осаждающийся на поверхности черного угольного электрода, очень отчетливо виден благодаря розово-красному цвету меди. Отрицательные ионы, являющиеся сернокислотными группами атомов, выделяются на поверхности анода — платиновой или золотой пластинки. При этом происходит вторичная реакция, состоящая в том, что отрицательные ионы вступают в химическое взаимодействие с водой и соединяются с водородом частиц воды, образуя частицы серной кислоты, а входивший в состав частиц воды кислород в газообразном виде выделяется на аноде как вторичный продукт электролиза. Если вместо платиновой или золотой пластинки применить медный анод, то отрицательные ионы в момент выделения из раствора всту-

пают в химическое соединение с атомами меди анода и вновь образуют частицы медного купороса, которые пополняют в растворе убыль этой соли, происходящую вследствие электролиза. Таким образом в случае медного анода при электролизе раствора медного купороса медь непрерывно переносится с анода на катод, где и отлагается в виде слоя чистой меди. Подобным путем на практике получают чистую медь высокого качества, причем посторонние примеси к меди анода обыкновенно оседают на дно сосуда, содержащего электролит. Явлением электролиза также широко пользуются на практике для покрытия различных металлических изделий медью, никелем, серебром, золотом и т. п. (см. § 72, гл. 9).

В виде второго примера рассмотрим электролиз водного раствора серной кислоты между платиновыми электродами. Каждая частица серной кислоты состоит из водорода и группы атомов, являющейся основным началом серной кислоты. При диссоциации частиц серной кислоты получаются водородный ион (положительный) и сернокислотный ион (отрицательный). При пропускании тока через подобный электролит водород в газообразном виде выделяется на катоде, а остаток серной кислоты (отрицательные ионы), освобождаясь из электролита у поверхности анода, вступает в химическое взаимодействие с водой, в результате которого на платиновом аноде выделяется кислород в газообразном виде и вновь образуются частицы серной кислоты в том же количестве, в каком они убывают из раствора, благодаря электролизу. Таким образом при электролизе раствора серной кислоты количество этой кислоты в растворе не изменяется, и в окончательном результате рассматриваемого случая электролиза разлагается только вода на свои составные части — водород и кислород. На практике таким способом пользуются при добывании водорода и кислорода в больших количествах, необходимых для целого ряда технических целей. Очень часто описываемый случай электролиза называют электролизом воды. Следует, однако, помнить, что это не совсем точно и что совершенно чистая вода сама по себе не только не подвергается электролизу, но даже не проводит тока.

Количество ионов, выделенных током при прохождении его через электролит, находится, как это следует из опытов Фарадея, в очень простом соотношении с количеством электричества, протекшего через электролит. Именно количество разложенного электролита или количество выделившихся ионов прямо соответствует количеству протекшего через электролит электричества. Чем больше или чем меньше будет это количество электричества, тем больше или меньше, и именно во столько же раз, будет и количество выделенных ионов. Это есть так называемый первый закон Фара-

дея, установленный им в области электролиза. Содержание второго закона Фарадея состоит в следующем. Если один и тот же ток проходит последовательно через ряд различных электролитов, то на электродах, погруженных в эти электролиты, выделяются вещества в количествах, строго соответствующих тем соотношениям, в которых данные вещества образуют между собой химические соединения. Таким образом зная количество некоторого вещества, выделяемого в виде ионов при прохождении через электролит определенного количества электричества, мы легко можем на основании данных химии определить и соответствующие количества разного рода других веществ, могущих быть выделенными из электролитов при прохождении через них того же количества электричества.

В виде примера можем указать, что 1 ампер-час (см. § 39) выделяет около $1\frac{1}{5}$ грамма меди (при электролизе раствора медного купороса) и около 4 граммов серебра.

Итак, при прохождении электрического тока через электролит, независимо от того, происходит ли это под влиянием внешней э. д. с. или в цепи действует только э. д. с., возникающая вследствие разности потенциалов электродов, погруженных в данный электролит (случай гальванических элементов и аккумуляторов, см. § 38), у электродов происходит в связи с движением ионов накопление продуктов электролиза. Благодаря этому, вообще говоря, изменяется разность потенциалов между электродом и электролитом. Электрод, как говорят, поляризуется. Явление же это называют поляризацией¹.

Взяв два совершенно одинаковых платиновых электрода и погрузив их в раствор серной кислоты, мы будем сначала иметь разность потенциалов между ними, равную нулю. Но если затем пропустим через данный раствор серной кислоты электрический ток, то у анода начнет выделяться кислород, а у катода — водород. Кислородные ионы покроют сплошным слоем один платиновый электрод, водородные же ионы — другой электрод. Электроды поляризуются. Даже после замыкания цепи тока потенциал одного из них, бывшего анодом, оказывается положительным по отношению к электролиту, потенциал же другого, бывшего катодом, оказывается отрицательным. Следовательно, благодаря предварительной поляризации между платиновыми электродами появляется разность потенциалов (в данном случае несколько больше 2 вольт). Если теперь соединить эти электроды простым провод-

¹ Слово «поляризация» в данном случае обозначает, что электрод приобретает добавочный положительный или отрицательный потенциал и становится положительным или отрицательным «полюсом».

ником, то в образовавшейся замкнутой цепи появится ток без всякой внешней э. д. с. за счет внутренней электродвижущей силы, которою в течение некоторого времени будет обладать описываемое устройство, состоящее из сосуда с раствором серной кислоты и погруженных в нее двух платиновых электродов, предварительно поляризованных или, как говорят, заряженных. Такое устройство, могущее служить источником тока, обычно называют элементом, точнее вторичным элементом, или аккумулятором (см. § 38), так как действие его не является вполне самостоятельным, а связано с предварительной зарядкой от постороннего источника тока. В описанном платиновом элементе, который можно называть платиновым аккумулятором, во время зарядки образовалась внутренняя электродвижущая сила, направленная обратно внешней электродвижущей силе постороннего источника, создававшего ток в цепи. Эту обратную электродвижущую силу посторонний источник тока должен был преодолевать, затрачивая на это электрическую энергию, запасаемую в аккумуляторе в виде химической энергии. Когда же такой предварительно заряженный элемент включается в некоторую цепь как самостоятельный источник тока, накопленную в нем энергию он возвращает в виде энергии электрического тока за вычетом неизбежных во всяком подобном устройстве потерь.

Для практических целей рассмотренный платиновый аккумулятор не пригоден главным образом ввиду высокой стоимости платины. Широкое применение получил так называемый свинцовый аккумулятор, в котором в раствор серной же кислоты погружены два свинцовых электрода. При зарядке свинцового аккумулятора (при его поляризации) на катоде выделяется водород, который восстанавливает следы окислов (соединений с кислородом) на поверхности свинцового электрода, на аноде же, где в итоге выделяется кислород, образуется слой перекиси свинца. Электродвижущая сила свежезаряженного свинцового аккумулятора несколько превышает 2 вольта. При разряде аккумулятора, т. е. при использовании его в качестве источника, ток проходит через электролит в обратном направлении. В этом же обратном направлении происходит и движение ионов в электролите, благодаря чему у поверхности электродов возникают химические реакции, в основном обратные тем, которые имели место при зарядке. Вообще внутри каждого элемента при его разряде, т. е. когда он работает в качестве источника тока, положительные (обычно — водородные) ионы движутся от катода к аноду в соответствии с направлением тока, а отрицательные ионы — от анода к катоду. Электродвижущая сила свинцового аккумулятора при его разряде более

или менее заметно уменьшается. Обычно прекращают разряд, когда э. д. с. упадет примерно до $1\frac{4}{5}$ вольта, после чего аккумулятор необходимо вновь зарядить, и он вновь делается готовым к работе в качестве источника тока. Кроме свинцовых аккумуляторов, в практике получили распространение также железо-никелевые аккумуляторы, устройство которых несколько сложнее устройства свинцовых. Но сущность того, что происходит во всех аккумуляторах, остается одной и той же. Во время зарядки за счет энергии электрического тока происходят изменения на электродах, и в аккумуляторе накапливается химическая энергия, которая при разряде возвращается обратно в виде энергии электрического тока.

При определении величины работоспособности аккумулятора принято говорить о его емкости, т. е. о количестве электричества, которое может протечь по цепи, питаемой от данного аккумулятора. Эту емкость обычно выражают в ампер-часах (см. § 39).

В так называемых первичных элементах, известных под названием гальванических элементов (см. § 38), сразу же берутся электроды, сильно различающиеся по своим химическим свойствам. В наиболее употребительных элементах в качестве электролита берутся растворы некоторых солей. В элементе Лекланшэ¹ электродами служат уголь (анод, положительный электрод) и цинк (катод, отрицательный электрод), опущенные в раствор нашатыря. Электродвижущая сила элемента Лекланшэ вначале достигает почти $1\frac{1}{2}$ вольта. При разряде гальванического элемента благодаря движению ионов в электролите и отложению их на электродах, в особенности на аноде, наблюдается явление поляризации, могущее в данном случае быстро и сильно ослабить э. д. с. элемента. Для уменьшения и замедления этого вредного действия применяют деполяризаторы², т. е. такие вещества, которые, взаимодействуя химически с водородными ионами, подходящими к аноду, ослабляют нежелательное явление поляризации. В элементах Лекланшэ в качестве деполяризатора применяют перекись марганца, богатую кислородом, который соединяется с водородом и дает воду, препятствуя водороду поляризовать анод. В этом случае перекись марганца (в более или менее измельченном виде) приводят в тесное соприкосновение с угольным анодом. Очень часто к электролиту элемента Лекланшэ прибавляют крахмал, муку, опилки и т. п. с целью лишить электролит способности

¹ Лекланшэ—французский изобретатель, работавший во второй половине прошлого века.

² Частица «де» латинского происхождения, применяется иногда для обозначения ослабления какого-либо свойства или явления.

вытекать из сосуда. В этих случаях цинковый катод делают в виде коробки из листового цинка, играющей роль сосуда элемента. Внутри помещают угольный электрод, окруженный деполаризатором, и оставшееся пространство заполняют полужидким электролитом, а затем все заливают составом из различных смол, выведя наружу проволоки, или зажимы, от электродов. Получается так называемый сухой элемент. Гальванические элементы после израсходования большей части запаса химической энергии, которой обладают составляющие его вещества, считаются отработавшими свой срок службы. Элементы Лекланше разряжают, пока их э. д. с. не упадет примерно до $\frac{3}{4}$ вольта.

44. ПРОХОЖДЕНИЕ ТОКА ЧЕРЕЗ ГАЗЫ

В обычном своем состоянии газы столь слабо проводят электрический ток, что требуются совершенно особые, в высшей степени чувствительные способы, чтобы это обнаружить. В связи с указанным обстоятельством газы принято рассматривать как среду, обладающую очень высокими изолирующими свойствами, т. е. как изоляторы. Существуют, однако, некоторые условия, при наличии которых газы начинают весьма заметно проводить электрический ток. Оказывается, например, что при прохождении через газ некоторых лучей, подобных световым, но имеющих более высокую частоту колебаний, при нагревании газов до достаточно высокой температуры, при воздействии на них достаточно сильного электрического поля, газы приобретают свойство проводимости. Подробное изучение различных случаев прохождения тока через газы приводит к заключению, что это свойство проводимости связано с появлением в газах положительно и отрицательно заряженных носителей электричества, которые, как и при электролизе, обычно называются ионами. Эти газовые ионы возникают благодаря расщеплению нейтральных частиц газа.

Можно считать с несомненностью установленным, что всегда при ионизации газа от нейтральной частицы отделяется электрон, который и является основным отрицательным ионом при прохождении тока через газ. Лишившаяся электрона газовая частица оказывается заряженной положительно и играет роль положительного иона. Сверх того, встречаются и тяжелые отрицательные ионы, образовавшиеся путем присоединения свободного электрона к какой-либо нейтральной частице газа. Наконец, и к свободному электрону, и к первичному положительному иону могут присоединяться целые группы нейтральных частиц, образующих довольно громоздкие скопления, значительно более тяжелые, чем обыч-

ные частицы газа. Получаются как бы целые грозди частиц, прилипших к электрону или к положительному остатку нейтральной частицы, т. е. к первичному положительному иону. Все эти ионы разного рода приходят в движение под действием электрического поля между электродами, ограничивающими газовый промежуток в цепи тока, и участвуют в явлении прохождения тока через газы. Итак, мы видим, что в газообразной среде характер носителей электричества может быть, вообще говоря, весьма разнообразный и во всяком случае более сложный, чем в электролитах. В связи с этим и условия прохождения электрического тока через газы более или менее осложняются.

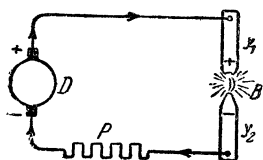
Электрическая проводимость газов в простейших условиях может быть наблюдаема, например, следующим образом. Мы знаем, что при зарядении электроскопа (фиг. 4) его листочки расходятся, взаимно отталкиваясь. Это расхождение листочков прекратится и они опадут, как только мы отведем к земле заряд электроскопа. Обычно мы производим разряжение электроскопа прикосновением хотя бы пальцев руки к его открытой металлической части. Того же можно достигнуть, ионизировав воздух в пространстве вокруг электроскопа. Между прочим с этой целью достаточно поднести зажженную спичку на расстояние нескольких сантиметров к металлической верхней части заряженного электроскопа. Горячие газы пламени, сильно ионизированные, сообщают воздуху проводимость, и вследствие этого электричество начнет более или менее быстро уходить с электроскопа, а листочки его начнут опадать и мало-помалу совсем сойдутся, свидетельствуя о разряжении электроскопа через ионизированный воздух.

Явление прохождения тока через ионизированный газ вообще принято называть электрическим разрядом через газ. На практике приходится наблюдать несколько различных видов электрического разряда через газ. При сравнительно небольших разностях потенциалов между электродами, ограничивающими газовый промежуток, ионизация газа обуславливает обычно прохождение слабого тока через этот промежуток. С увеличением разности потенциалов выше некоторого предела, определяемого в каждом частном случае расстоянием между электродами и их формой, сила тока возрастает весьма заметно и начинает слышаться шум, сопровождающий прохождение тока в этом случае, называемом тихим разрядом. В темноте более или менее отчетливо наблюдается свечение газа при наличии тихого разряда. Наиболее яркое свечение обычно имеет место у краев электродов, в особенности, если эти края острые. У острых краев электродов наблюдаются как бы светящиеся кисточки. Подобное

свечение у поверхности электродов иногда наблюдается на проводах линии передачи электрической энергии, когда напряжение между проводами по той или иной причине становится выше некоторого допустимого предела. При этом в темноте совершенно отчетливо видно, что провода окружены светящимся слоем, так называемой *к о р о н о й*¹. В случае разреженных газов явление тихого разряда приобретает форму так называемого *г л е ю щ е г о* разряда и обычно сопровождается довольно сильным свечением всей массы газа. Для практического использования *г л е ю щ е г о* разряда (с осветительными целями) разреженные газы обычно заключают в стеклянные сосуды, в которые впаяны электроды, подводящие ток к разреженным газам.

В явлении тихого разряда мы встречаемся с более или менее обильным образованием ионов под влиянием электрического поля, когда сила его становится достаточно большой. В подобных условиях ионы, имеющиеся в газовой среде хотя бы в самых ничтожных количествах, начинают двигаться и приобретают в электрическом поле столь большие скорости, что благодаря их значительной кинетической энергии при ударе о встречающиеся на пути нейтральные частицы эти последние разбиваются на пары ионов, которые в свою очередь приобретают большие скорости и расщепляют новые нейтральные частицы и т. д. Описываемое ускоренное образование газовых ионов при отсутствии каких-либо ограничивающих условий иногда заходит так далеко, что разряд внезапно переходит в форму так называемого *р а з р ы в н о г о* разряда или *и с к р ы*, которая имеет вид очень яркой, сильно раскаленной нити, кратковременно соединяющей противоположные электроды и сопровождающейся треском, иногда подобным выстрелу. В природе мы наблюдаем такого рода электрические искры громадных размеров и называем их *м о л н и е й*. Через посредство молнии разряжаются на землю заряженные до очень высокого потенциала (много миллионов вольт) грозовые облака. Так как электрические искры обычно стремятся проскакать между электродами по более или менее короткому пути, то для предохранения разного рода сооружений от ударов молнии располагают выше защищаемого сооружения какие-либо металлические проводники, хорошо соединенные с землей при посредстве, например, закопанных во влажную почву металлических листов. *Г р о м о т в о д* такого рода чаще всего устраивают в виде шеста, располагаемого на наивысшей части здания и снабженного на конце металлическим острием, которое соединяется с землей достаточно толстым проводом. Для защиты линий пере-

¹ Латинское слово «корона» обозначает «венец», «обкладка».



Фиг. 44. Вольтова дуга между угольными электродами.

дачи электрической энергии от грозových разрядов над проводами линии иногда протягивают хорошо заземленный стальной канат, который и принимает на себя удары молнии.

При образовании искры на пути тока в газе выделяется большое количество тепла, причем сильно нагреваются и самые электроды. Опыт показывает, что накалинные проводники обильно выделяют из себя электроны. В связи с этим при благоприятных обстоятельствах искровой разряд может перейти в так называемую *вольтову дугу*¹. Основным условием, необходимым для образования вольтовой дуги, является обильное выделение электронов с накаливаемой поверхности отрицательного электрода, т. е. катода. В вольтовой дуге главными носителями электричества в явлении тока через промежуток между электродами служат именно электроны, излучаемые накаленной поверхностью катода. Возникновение вольтовой дуги возможно и без предварительного образования искры между ее электродами. Для этого бывает достаточно только свести электроды до соприкосновения и затем медленно их раздвинуть. В последний момент перед разведением электродов благодаря большому сопротивлению в месте слабого контакта и при достаточной силе тока выделяется значительное количество джоулева тепла, так что поверхность отрицательного электрода (катода) может столь сильно нагреться, что с него начинают выделяться электроны.

Если э. д. с. генератора не меньше нескольких десятков вольт, то при дальнейшем раздвигании электродов и возникает вольтова дуга. Катод продолжает поддерживаться при высокой температуре за счет расхода энергии в дуге. Особенно легко образуется вольтова дуга между угольными электродами.

В виде примера на фиг. 44 представлена вольтова дуга B между угольными электродами U_1 и U_2 , включенная в цепь динамомашины D . P — добавочный реостат, обычно включаемый в цепь, в которой горит вольтова дуга, и служащий для того, чтобы сила тока не превзошла допустимого предела. Через некоторое время после начала горения дуги (в воздухе) концы угольных электродов принимают показанную на рисунке форму. Конец положительного угля U_1 (анода) лишь

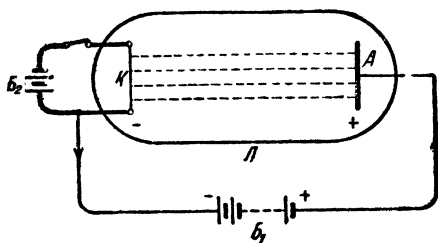
¹ Описываемое явление названо так в честь Вольты в связи с тем, что оно было открыто вскоре после изобретения им первого источника электрического тока — «вольтова столба», представляющего собой своеобразную батарею из большого числа последовательно соединенных элементов.

слегка утончается, но остается все время тупым, и на нем образуется даже небольшое углубление, называемое кр^ат^ером¹. Конец отрицательного угля $У_2$ (катода) заостряется. Напряжение между электродами вольтовой дуги в описываемых условиях бывает обычно около 40 вольт, если длина дуги не превосходит нескольких миллиметров. Температура газов в вольтовой дуге достигает $5\,000^\circ\text{C}$, температура заостренного конца угольного катода бывает около $3\,000^\circ\text{C}$ и температура кратера — около $3\,500^\circ\text{C}$. Вольтова дуга между угольными электродами дает ослепительно яркий свет, исходящий главным образом с поверхности раскаленного кратера. С этим связано применение вольтовой дуги для освещения (см. § 63, гл. 7). Кроме того вольтова дуга используется для плавления металлов при электрической сварке и в специальных электрических печах. В этих случаях чаще всего применяется один или оба электрода из обрабатываемого металла, а сила тока нередко достигает сотен и даже многих тысяч ампер (см. § 70 и 71, гл. 9).

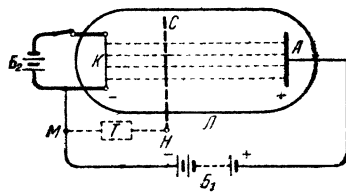
Обильное выделение электронов с поверхности раскаленных проводников находит широкое применение в технике. Представим себе некоторый стеклянный сосуд L (фиг. 45), из которого выкачан воздух наиболее совершенным способом, т. е. в котором создан так называемый в^ак^уум². Допустим, что в этом сосуде находятся два электрода A и K , играющие роль анода и катода и через соответствующие впаянные в стекло металлические выводы присоединенные к соответствующим зажимам батареи B_1 . Анод A представляет собой простую металлическую пластинку. Катод K состоит из тонкой тугоплавкой проволоки, которая может накаливаться током от вспомогательной батареи B_2 . Пока катод K не накален, т. е. пока цепь батареи B_2 разомкнута, ток от батареи B_1 не проходит через лишенное газа пространство между электродами A и K , хотя бы э. д. с. батареи B_1 и, следовательно, разность потенциалов между A и K были очень велики. Но как только мы замкнем цепь вспомогательной батареи накала B_2 и нить K раскалится, тотчас же с поверхности этой нити начнут выделяться электроны, которые, будучи носителями отрицательного электричества, станут двигаться по направлению к притягивающему их аноду A , и таким образом потечет ток от батареи B_1 через пространство внутри стеклянного сосуда (пути электронов внутри стеклянного сосуда условно показаны на фиг. 45 пунктирными линиями).

¹ Латинское слово «кратер» обозначает «чаша».

² Латинское слово «в^ак^уум» обозначает «порожнее», «пустое». Понимается «пустое пространство».



Фиг. 45 Вакуумная трубка с накалимым катодом.



Фиг. 46. Вакуумная трубка с накалимым катодом и сеткой.

Сила тока от батареи B_1 будет полностью зависеть от того, сколько электронов, отделившихся от накалимого катода K , будет в единицу времени доходить до анода A . Всякое обстоятельство, могущее так или иначе влиять на количество этих электронов, будет неминуемо отражаться на силе тока, идущего от батареи B_1 к аноду A , т. е. так называемого анодного тока. На фиг. 46 показано в самом общем виде устройство, в котором достигается управление анодным током. В отличие от того, что было изображено на фиг. 45, здесь на пути потока электронов, так называемого катодного потока, идущего от катода K к аноду A , расположена металлическая сетка C , поддерживаемая выведенным наружу проводником H . Разность потенциалов между сеткой C и катодом K может по произволу изменяться при помощи особого устройства T , включенного между точками M и H . Если теперь мы сообщим сетке C отрицательный заряд, то электроны, исходящие из катода K , будут отталкиваться от сетки назад к катоду K и таким образом на их пути к аноду A встретится преграда. Отрицательно заряженная сетка как бы запрет ток в цепи батареи B_1 , и он либо сильно ослабевает, либо совсем прекратится. Наоборот, заряжая сетку C положительным электричеством, мы в известных пределах будем только облегчать продвижение электронов от катода K к аноду A . В связи с этим анодный ток (от батареи B_1) возрастает в большей или меньшей степени в зависимости от величины положительной электризации сетки C . Итак, меняя разность потенциалов между катодом K и сеткой C , мы можем в больших пределах изменять силу анодного тока от батареи B_1 . Сравнительно незначительные изменения потенциала сетки могут иметь результатом большие изменения анодного тока. Все это является причиной того, что описанный трехэлектродный прибор широко используется в радиотехнике для усиления электромагнитных колебаний (усилительные лампы), а также для возбуждения электромагнитных колебаний (генераторные лампы).

Устройства, подобные представленному на фиг. 45, широко применяются на практике, когда оказывается необходимым так составить цепь, чтобы электрический ток по ней мог проходить только в одном направлении. Действительно, если нагретый электрод K присоединить к положительному зажиму источника тока B_1 , а холодный электрод A — к отрицательному зажиму, то в таком случае ток по цепи не будет проходить, так как с холодного электрода A электроны обычно не выделяются. Если бы вместо батареи B_1 мы применили какой-либо источник переменного тока, то по цепи будет проходить ток лишь в направлении от холодного анода A к горячему катоду K , а в обратном направлении ток проходить не будет. На этом основано устройство электронно-вакуумных выпрямителей переменного тока, нашедших себе применение в ряде случаев. В дальнейшем (см. § 60, гл. 6) мы более подробно остановимся на выпрямителях, в которых используется разряд через разреженные газы (ртутные выпрямители).

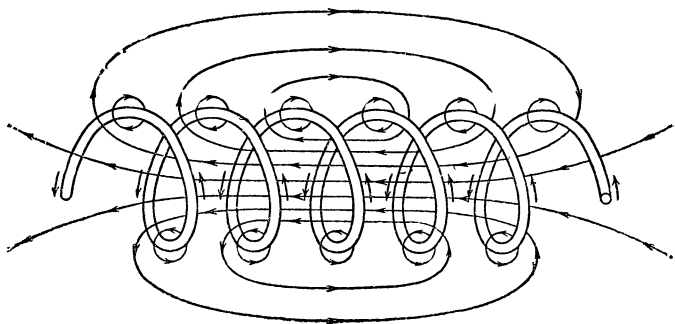
Скажем еще несколько слов о так называемых фотоэлементах. Они основаны на выделении электронов с поверхности некоторых металлов (цинк, цезий и т. д.) при падении света на эту поверхность. Если бы в приборе, изображенном на фиг. 45, мы расположили в вакууме вместо накаливаемого катода K холодный катод, покрытый цезием, то в темноте через такой прибор ток совершенно не будет проходить. Однако, как только мы осветим поверхность цезиевого катода (через стеклянные стенки сосуда), тотчас же начнет проходить ток, потому что с данной поверхности начнут выделяться электроны. Сила возникшего тока будет тем больше, чем сильнее освещение. Фотоэлементы широко применяются в современных устройствах для передачи изображений на расстоянии, в звуковом кино и т. д.

Поток первичных электронов, падая на холодный анод с большой скоростью, выбивает с поверхности этого анода так называемые вторичные электроны, которые с успехом могут быть применены для усиления тока, проходящего через вакуум.

Вообще в настоящее время для самых разнообразных целей разработано большое количество приборов, в которых используются рассмотренные вкратце особенности прохождения тока через разреженное пространство (вакуумные приборы).

45. ЭЛЕКТРОМАГНИТ. МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ

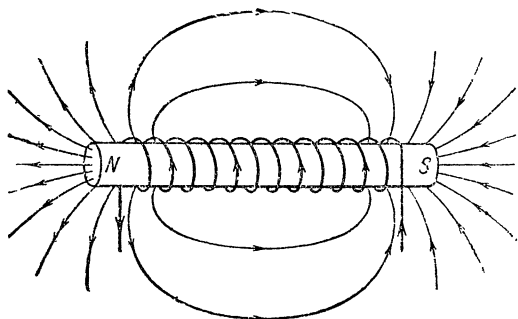
Мы знаем, что кусок железа, помещенный в магнитном поле, приобретает свойства магнита, т. е. намагничивается (см. § 29 и 31, гл. 3). Следовательно, если мы возьмем кусок



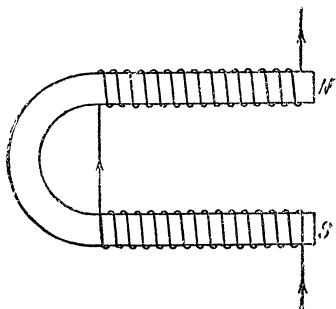
Фиг. 47. Магнитное поле катушки из нескольких витков, по которым идет ток.

железа, совершенно лишенный свойств магнита, и расположим его вблизи проводника, по которому течет электрический ток (см. § 37), то этот кусок железа намагнитится. Мы получим таким образом искусственный магнит, свойства которого обуславливаются существованием электрического тока. Подобные магниты называются **электромagnитами**.

Практически, при устройстве электромагнитов, стремятся придать проводнику, по которому течет возбуждающий ток, наиболее благоприятную форму в смысле образования сильного магнитного поля. Это необходимо для того, чтобы получать сильные электромагниты. С этой целью обычно обматывают изолированную проволоку вокруг железного сердечника, т. е. вокруг железного стержня, прямого или надлежащим образом изогнутого. Другими словами, помещают железный сердечник внутри катушки, состоящей из изолированной проволоки, по которой и пропускают ток для возбуждения электромагнита. Магнитное поле подобной катушки имеет вид, представленный на фиг. 47 тонкими линиями. В данном случае магнитные линии, обычно охватывающие один только провод, по большей части сливаются в общий для ряда витков магнитный поток, который сильно сгущается внутри катушки. Итак, если поместить внутрь такой катушки, по которой протекает электрический ток, кусок железа в виде стержня или полосы, то мы будем иметь все условия, необходимые для намагничивания этого куска железа. Получаем таким образом **прямолинейный электромагнит** (фиг. 48), спектр которого, вообще говоря, вполне подобен спектру стального магнита тех же размеров. Иногда оказывается удобным придавать железному сердечнику форму подковы; таким образом получают **общеупотребительный подковообразный электромагнит**, схема обмотки которого представлена на фиг. 49.



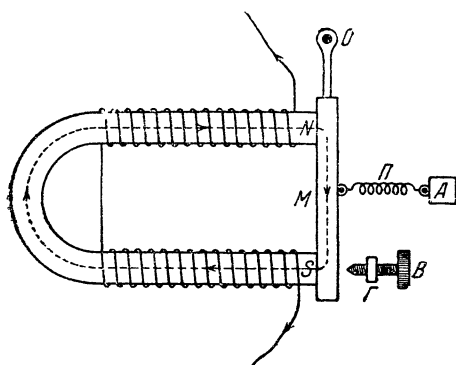
Фиг. 48. Прямолинейный электромагнит.



Фиг. 49. Подковообразный электромагнит.

Практическое применение электромагнитов чрезвычайно разнообразно. Во всех так называемых электромагнитных механизмах основной частью является именно электромагнит той или иной формы, возбуждаемый при прохождении тока по его обмотке и практически почти совершенно теряющий свое магнитное состояние при прекращении тока, если только сердечник изготовлен из достаточно мягкого железа. Электромагнитами же обычно пользуются для создания основного магнитного потока во всех динамомашинах и вообще во всех электромагнитных генераторах. Упомянем еще о применении электромагнита для целей сигнализации (телеграфия, телефония, электрический звонок и т. д.), которая использует свойство его возбуждаться только при пропускании тока через его обмотку и менять степень своего магнитного состояния в зависимости от силы этого тока. Наконец, надлежащим образом построенные электромагниты применяются для поднятия грузов, состоящих из железных, стальных или чугунных частей, которые плотно притягиваются к полюсам сильно возбужденного электромагнита, прикрепляемого к концу цепи или каната, составляющего часть какого-либо подъемного приспособления.

В механизмах, в которых применяется электромагнит, он обычно снабжается так называемым якорем, представляющим собой железную часть, чаще всего в виде полосы из мягкого железа, которая притягивается к полюсам электромагнита при его возбуждении, а по прекращении возбуждения оттягивается назад какой-либо пружиной в исходное положение, на некотором определенном расстоянии от полюсов. Таким именно образом в большинстве случаев производится требуемая от электромагнита работа. В виде примера на фиг. 50 изображен подковообразный электромагнит NS с притянутым к нему железным якорем M , который может по



Фиг. 50. Подковообразный электромагнит с якорем.

ворачиваться вокруг точки *O*. В случае прекращения возбуждения электромагнита он перестанет притягивать якорь. В рассматриваемом примере якорь *M* тотчас же оттянется спиральной пружиной *P*, которая одним концом прикреплена к якорю, а другим — к стойке *A*. Для того чтобы оттянутый пружиной якорь не отошел на слишком большое расстояние от полюса электромагнита,

применяется какое-либо упорное приспособление, например, винт *B*, поддерживаемый неподвижной стойкой *Г*. Вращая головку винта, можно установить большее или меньшее расстояние между якорем *M* и полюсами невозбужденного электромагнита, в зависимости от обстоятельств.

На фиг. 50 пунктирной линией показан в общем виде путь магнитного потока через сердечник электромагнита, через якорь и через две щели между якорем и полюсами. Принято называть магнитной цепью весь замкнутый путь всякого магнитного потока. При данных неизменных размерах всех частей магнитной цепи полная величина возбуждаемого током магнитного потока в известной степени будет тем больше, чем больше сила этого тока и чем больше витков проволоки намотано на сердечник. Иными словами, степень возбуждения электромагнита зависит от произведения силы тока на число витков, т. е. от числа так называемых ампер-витков. Для определения числа ампер-витков имеем, следовательно, такое соотношение:

$$\text{число ампер-витков} = \text{сила тока (в амперах)} \times \text{число витков}.$$

Если, например, через обмотку некоторого электромагнита пропускается ток силой в 2 ампера, а число витков в обмотке равно 250, то число ампер-витков равно $2 \times 250 = 500$. Возбуждение электромагнита останется тем же и в случае, когда обмотка содержит 2 000 витков, но сила тока равна $\frac{1}{4}$ ампера, так как $\frac{1}{4} \times 2\,000 = 500$.

При одном и том же неизменном числе ампер-витков, т. е. при неизменном возбуждении электромагнита, магнитный поток будет тем больше, чем меньше длина и чем больше поперечное сечение магнитной цепи. В этом отношении дело

обстоит совершенно подобно тому, что мы имеем в цепи электрического тока. Как это следует из § 39 и 40, при одной и той же неизменной э. д. с. сила тока будет тем больше, чем меньше длина и чем больше поперечное сечение проводников, из которых составлена электрическая цепь. Иными словами, сила тока тем больше, чем меньше электрическое сопротивление цепи. В силу этого внешнего сходства принято говорить о магнитном сопротивлении магнитной цепи. При этом магнитное сопротивление, подобно электрическому сопротивлению, вполне определяется длиной и поперечным сечением соответствующего участка магнитной цепи, а также свойствами вещества, из которого состоит данный участок. В магнитной цепи свойства вещества находят свое выражение в магнитной проницаемости этого вещества. Полное магнитное сопротивление магнитной цепи складывается из сопротивлений отдельных участков цепи. В связи с изложенным магнитный поток, образующийся в магнитной цепи электромагнита, выражают следующим образом:

$$\text{магнитный поток} = \frac{\text{число ампервитков}}{\text{магнитное сопротивление}}.$$

Соотношение это по своей форме весьма напоминает закон Ома, установленный для электрических цепей. Рассматриваемое соотношение принято называть законом магнитной цепи, а число ампер-витков называют магнитодвижущей силой. Таким образом можно написать

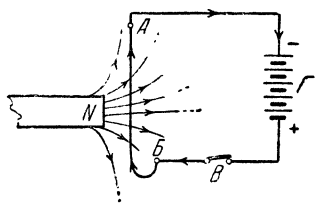
$$\text{магнитный поток} = \frac{\text{магнитодвижущая сила}}{\text{магнитное сопротивление}}.$$

При всех расчетах магнитных цепей пользуются указанным законом магнитной цепи.

При устройстве электромагнитов в их железных сердечниках допускают магнитную индукцию, доходящую до 15 000—20 000 гауссов. Соответствующая этому магнитная сила внутри возбуждающей катушки колеблется примерно в пределах от 50 до 200 эрстедов, в зависимости от магнитной проницаемости применяемого сорта железа и от формы магнитной цепи.

46. МЕХАНИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК. ЗАКОН ЛЕНЦА

Из предыдущего мы знаем, что электрический ток действует чисто механически на магнитную стрелку и вообще на магнит. Это происходит оттого, что со всяким электрическим током теснейшим образом связано присущее ему маг-

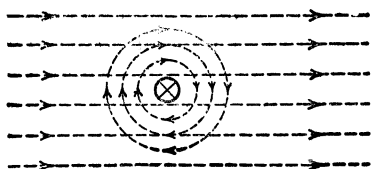


Фиг. 51. Механическое действие внешнего магнитного потока на помещенный в нем гибкий проводник с током.

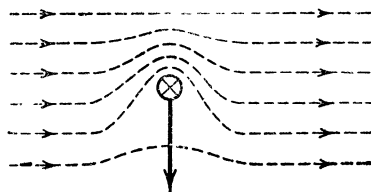
нитное поле (см. § 36, 37 и 45), которое непосредственно и действует на магнитные полюсы стрелки или магнита. И обратно магнитное поле какого-либо магнита, и вообще всякое так называемое внешнее магнитное поле, действует механически на помещенный в нем проводник с током, т. е. стремится привести его в движение. Если, например, включить в цепь электрического генератора Γ гибкий шнур AB (фиг. 51), свитый из отдельных тонких проволок, и затем поднести к этому шнуру, по которому идет электрический ток, магнит, т. е. создать около данного проводника с током внешнее магнитное поле, то мы увидим, что гибкий проводник AB придет в движение и отклонится в сторону. Это свидетельствует о том, что на проводник с током действует некоторая механическая сила, возникающая вследствие наличия внешнего магнитного поля. Необходимо при этом отметить, что рассматриваемая механическая сила действует поперек внешнего магнитного поля. В случае, представленном на фиг. 51, при направлении электрического тока от B к A , гибкий проводник будет стремиться двигаться от нас, поперек магнитных линий, исходящих из полюса N . При обратном направлении тока (от A к B) гибкий проводник будет двигаться к нам. Описываемый опыт можно произвести и иначе. Оставляя магнит неподвижным, можно при помощи некоторого выключателя B то размыкать цепь тока, то вновь ее замыкать. При разомкнутой цепи гибкий провод свободен свешивается, а при замыкании тока он приходит в движение и отклоняется в ту или иную сторону, в зависимости от направления тока, но всегда поперек магнитных линий внешнего поля и никогда не вдоль этих линий.

Механическое действие внешнего магнитного поля на проводник с током находит себе широкое применение в современной электротехнике при устройстве электродвигателей. Движение в них обычно получается именно благодаря действию рассматриваемой механической силы электромагнитного происхождения. Для этой цели в магнитном поле, производимом электромагнитом, соответственным образом располагают подвижные проводники, по которым пропускают ток (см. § 64 и 65, гл. 8).

Действие внешнего магнитного поля на помещенный в нем проводник с током весьма просто объясняется свойствами магнитных линий: их стремлением укорачиваться и стягиваться, а также существованием бокового распора в пучке

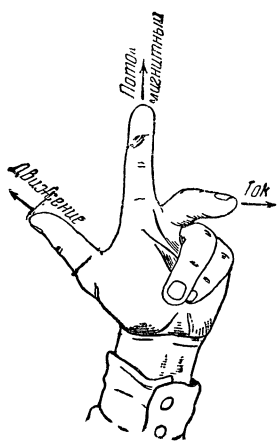


Фиг. 52. Наложение внешнего магнитного поля на поле прямолинейного тока.



Фиг. 53. Слияние внешнего магнитного поля и поля прямолинейного тока. Проводник испытывает механическое действие со сторон более густо расположенных магнитных линий, т. е. сверху вниз.

магнитных линий (см. § 30, гл. 3). Дело в том, что при внесении в какое-либо внешнее магнитное поле проводника с током магнитное поле тока накладывается на внешнее поле, преобразуется и некоторым образом сливается с ним, искажая его. В связи с этим искажением создается неодинаковый боковой распор магнитных линий по обе стороны проводника с током, и он выталкивается в ту сторону, где распор меньше. Для пояснения сказанного рассмотрим какое-либо внешнее магнитное поле, которое ради простоты представлено на фиг. 52 прямыми пунктирными линиями, идущими слева направо. Допустим, что в это магнитное поле внесен прямолинейный проводник с током и расположен поперек поля. Кружок с крестиком на фиг. 52 изображает этот проводник, идущий от нас по ту сторону чертежа, причем крестик условно обозначает, что электрический ток направлен именно от нас. Собственное магнитное поле тока представлено рядом круговых линий, направленных в данном случае, согласно правилу штопора, по часовой стрелке. Итак, мы имеем как бы одновременное существование двух магнитных полей разного происхождения. Как видно на фиг. 52, в некоторых частях поля, а именно кверху от проводника, направление магнитных линий тока будет совпадать с направлением линий внешнего поля; в других же частях поля, книзу от проводника, эти два направления будут обратны одно другому. Но эти две группы магнитных линий не могут одновременно существовать самостоятельно. Как показывает опыт, в действительности обе группы магнитных линий сливаются и преобразуются в один общий магнитный поток (фиг. 53), который в рассматриваемом примере оказывается гуще над проводом и реже под проводом соответственно тому, что в одном случае магнитные линии первоначальных потоков направлены в одну и ту же сторону, а в другом случае — в противоположные стороны. Следовательно, при том



Фиг. 54. Правило левой руки.

направлении внешнего магнитного поля и электрического тока, которое изображено на фиг. 53, боковой распор магнитных линий общего потока будет больше над проводом, чем под проводом. Благодаря этому провод с током стремится двигаться сверху вниз, как это и показано стрелкой.

Рассматривая фиг. 52 и 53, мы видим, что если бы при том же направлении поля изменилось направление тока, т. е. если бы ток шел из-за рисунка к нам, то должно было бы измениться и направление механической силы, действующей в этих условиях на проводник: он стремился бы двигаться снизу вверх.

Если одновременно изменятся и направление тока и направление внешнего магнитного поля, то направление силы, действующей на проводник, останется неизменным.

Вообще в данном случае три направления — магнитного потока, проводника с током и возникающей механической силы, действующей на проводник, связаны между собой совершенно определенным соотношением. Зная два из этих направлений, всегда можно найти третье. С этой целью можно воспользоваться, например, построением действительной картины поля, как это показано на фиг. 53. На практике часто пользуются более упрощенными способами для определения направления движения проводника с током в магнитном поле. Между прочим, очень удобно так называемое правило левой руки, подобное правилу правой руки (см. § 37). Это правило следующее:

Если три пальца левой руки — большой, указательный и средний, — расположить по трем взаимно перпендикулярным направлениям (фиг. 54) и затем указательный палец направить вдоль магнитного потока (внешнего), а средний палец вдоль тока в некоторой части проводника, то направление большого пальца даст нам направление возникающей механической силы, стремящейся двигать данную часть проводника.

При применении правила левой руки полезно помнить, что здесь, как и в правиле правой руки, три основных направления — Движения, Поток и Ток — располагаются в алфавитном порядке (Д, П и Т) вдоль первого, второго и третьего пальцев левой руки.

В справедливости только что приведенного правила нетрудно убедиться, сопоставляя его с фиг. 53.

Рассматриваемые механические взаимодействия электрического тока с внешним магнитным полем не зависят от того, каково происхождение этого внешнего поля. В частности, это может быть магнитное поле другого, соседнего, проводника с током. Благодаря этому первый проводник будет притягиваться ко второму или отталкиваться от него, в зависимости от направления электрических токов в них. И наоборот, второй проводник с током будет испытывать механическое воздействие со стороны магнитного поля первого проводника. Такого рода механическое взаимодействие двух токов называется *электродинамическим*¹ взаимодействием. Путем рассмотрения налагающихся друг на друга магнитных полей обоих проводников (подобно тому, как это показано на фиг. 52 и 53) нетрудно убедиться в том, что *два расположенных один вдоль другого проводника с токами притягиваются, когда токи в них идут по одному и тому же направлению, и взаимно отталкиваются, когда токи в них идут по противоположным направлениям.*

Опыт показывает, что сила механического взаимодействия тока и внешнего магнитного потока тем больше, чем больше сила тока при прочих равных условиях. В случае электродинамического взаимодействия двух токов оно тем значительнее, чем больше сила каждого из взаимодействующих токов.

Рассмотренное механическое взаимодействие проводника, по которому течет электрический ток, и внешнего магнитного потока представляет собой явление в некотором смысле обратное тому, что мы имеем в случае электромагнитной индукции тока. Действительно, в этом последнем случае возникает электрический ток, когда некоторый проводник, входящий в состав замкнутой цепи, внешней механической силой приводится в движение поперек какого-либо магнитного потока. И наоборот, когда этот проводник с возбужденным в нем от постороннего источника электрическим током того же направления расположен поперек такого же внешнего магнитного потока, то возникает механическая сила, стремящаяся двигать проводник в направлении, как раз противоположном тому, по которому этот проводник приводился в движение при индуктировании электрического тока. Эти обратные соотношения и находят свое выражение между прочим в том, что три направления (Движения, Поток и Ток) связаны: правилом правой руки в случаях электро-

¹ Греческое слово «динамис» значит «сила».

магнитной индукции и правилом левой руки в случае механического действия магнитного потока на электрический ток.

Вообще говоря, механическое взаимодействие электрического тока с внешним магнитным потоком совершенно не зависит от того, какими именно причинами вызвано появление тока в данном проводнике. В частном случае это может быть ток, индуцированный благодаря движению проводника поперек того самого магнитного потока, с которым и взаимодействует механически данный ток. Таким образом мы должны придти к заключению, что при возбуждении тока электромагнитными генераторами (динамомашинами) первичный механический двигатель, приводящий во вращение генератор, должен преодолевать сопротивление механической же силы взаимодействия этого тока с основным магнитным потоком самого генератора. Работа первичного двигателя расходуется именно на преодоление этой противодействующей механической силы и затем преобразуется в энергию возбуждаемого в генераторе электрического тока. Все в данном случае вполне согласуется с законом сохранения энергии (см. § 3, гл. 1). В соответствии со всем вышесказанным можно установить следующее положение.

Направление индуцированного тока всегда таково, что возникающая сила механического взаимодействия этого тока с внешним магнитным потоком стремится препятствовать тому движению, благодаря которому индуцируется ток.

Приведенное положение впервые было высказано Ленцем и потому носит название **закона Ленца**¹.

На любом опыте, на любом явлении, в котором мы встречаемся с электромагнитной индукцией, нетрудно удостовериться в справедливости закона Ленца. Так, например, легко обнаружить, что для вращения электромагнитного генератора (динамомашины) необходимо значительно большее усилие, когда он развивает в цепи ток, чем при так называемом холостом ходе машины, т. е. при разомкнутой цепи. И чем сильнее ток, генерируемый динамомашиной, тем это усилие будет больше. В опыте с динамомашиной, дающей постоянный ток, справедливость закона Ленца можно доказать еще следующим образом. Оставляя неизменным основной магнитный поток динамомашины, создаваемый обычно специальным электромагнитом, мы можем пустить в ее подвижную обмотку ток от другого источника и притом ток такого же направления, какое получалось от рассматриваемой динамомашины, когда она приводилась механическим двигателем во

¹ Ленц (1804—1865) — русский физик, известный своими многочисленными исследованиями в области учения об электромагнитных явлениях.

вращение в некоторую определенную сторону. Мы увидим, что динамомашинка сама начнет вращаться в противоположную сторону. Этот опыт доказывает нам еще так называемую обратимость динамомашины: динамомашинка-генератор превращается в электродвигатель, если питать ее током от постороннего генератора (см. § 64, гл. 8). Обратимость динамомашины имеет чрезвычайно большое практическое значение.

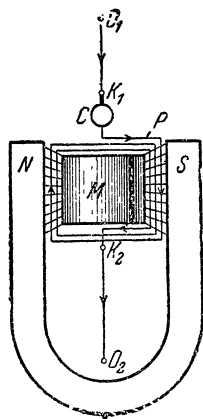
В заключение настоящего параграфа еще раз подчеркнем, что направление сил механического взаимодействия проводника с током и внешнего магнитного поля сохраняется то же самое, в случае если и направление тока и направление магнитного поля одновременно изменяются на обратное. Точно так же и направление сил электродинамического взаимодействия двух проводников, по которым протекают токи, сохраняется неизменным, когда оба тока одновременно начнут протекать в обратном направлении. Все это в каждом частном случае может быть проверено при помощи правила левой руки или путем построения картины окончательного расположения магнитных линий, подобно тому как это изображено на фиг. 53.

47. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ. АМПЕРМЕТР И ВОЛЬТМЕТР

Для обнаружения электрического тока и для измерения его силы чаще всего пользуются механическим взаимодействием между этим током и посторонним магнитом или между двумя проводниками, по которым проходит ток. В частном случае роль постороннего магнита может играть кусок мягкого железа, намагничиваемого в поле измеряемого тока.

Уже в нашем основном опыте с электромагнитной индукцией тока (см. § 36, фиг. 27) мы, пользуясь магнитной стрелкой, обнаруживали появление тока в цепи при известных условиях. В схеме, изображенной на фиг. 27, часть цепи B вместе с магнитной стрелкой $N_1 S_1$ может быть рассматриваема как прибор, служащий для обнаружения электрического тока. Вообще все приборы, позволяющие обнаруживать присутствие тока в цепи и обычно основанные на механическом взаимодействии тока и магнита, принято называть гальваноскопами. Это название возникло вследствие того, что в прежнее время электрический ток называли гальваническим током по имени Гальвани¹, открывшего это явление. Те гальваноскопы, которые снабжены приспособлениями для измерения силы взаимодействия тока и магнита и которые,

¹ См. примечание к § 38.



Фиг. 55. Схема гальванометра с подвижной катушкой.

следовательно, дают возможность судить и о силе тока, называются гальванометрами¹.

Устройство гальванометров может быть двоякого рода. Можно сделать неподвижным проводник, по которому идет ток, и предоставить перемещаться магниту; можно также закрепить магнит и сообщить подвижность самому проводнику, по крайней мере в той его части, которая находится в области поля магнита. В обоих случаях обыкновенно ради увеличения сил взаимодействия проводнику придают форму витков, иногда очень многочисленных.

Гальванометр, состоящий из неподвижной катушки с большим или меньшим числом витков хорошо изолированной проволоки и из подвешенной внутри этой катушки магнитной стрелки, могущей отклоняться под влиянием тока, в настоящее время сравнительно мало употребляется и практически почти совершенно вытеснен гальванометром с подвижной катушкой, надлежащим образом подвешенной в магнитном поле неподвижного постоянного магнита. На фиг. 55 представлено в самом общем виде взаимное расположение отдельных частей подобного гальванометра. Прямоугольная рамочка P , обычно состоящая из большого числа витков изолированной проволоки, подвешена между полюсами магнита N и S при помощи двух очень тонких, но достаточно упругих проволочек O_1K_1 и O_2K_2 , закрепленных в двух неподвижных точках O_1 и O_2 , к которым подводится измеряемый ток. Для усиления магнитного поля в том месте, где расположены взаимодействующие с этим полем части подвижной рамочки P , между полюсами N и S обычно располагают неподвижный цилиндр M из мягкого железа так, чтобы между его поверхностью и поверхностями полюсов N и S оставались узкие щели, необходимые для свободного перемещения рамочки P . Пользуясь правилом левой руки, нетрудно видеть, что при прохождении тока по виткам в направлении от O_1 к O_2 левая сторона рамочки будет стремиться двигаться от нас, а правая сторона рамочки — к нам, благодаря чему рамочка будет поворачиваться вокруг линии O_1O_2 . Для обнаружения этого поворота и для измерения его величины с рамочкой прочно связывают более или менее длинную и очень легкую стрелочку (не показанную на фиг. 55), конец которой рас-

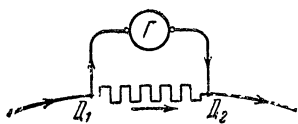
¹ Греческое слово «метрón» значит «мера».

полагают над шкалой с делениями, или же прикрепляют к рамочке маленькое зеркальце C (фиг. 55). Пучок света какой-либо лампочки, отраженный от этого зеркальца, падает затем на сравнительно далеко расположенную шкалу с делениями, и по положению «зайчика» на шкале можно судить о степени отклонения рамочки гальванометра. Иногда зеркальце C используют другим способом. При помощи зрительной трубы рассматривают отражение шкалы в зеркальце гальванометра. При повороте рамочки и скрепленного с ней зеркальца мы будем видеть уже другое деление шкалы и делаем отсчет, наблюдая через зрительную трубу цифровые надписи на шкале.

Упругие тонкие проволоочки O_1K_1 и O_2K_2 играют двойную роль. С одной стороны, они поддерживают подвижную рамочку P и позволяют подводить извне ток к намотанным на ней виткам изолированной проволоки. С другой стороны, благодаря упругости проволоочек O_1K_1 и O_2K_2 рамочка P всегда стремится располагаться строго определенным образом и возвращается в начальное положение, как только прекращается протекавший через нее ток. В то же время при прохождении тока через гальванометр сила кручения упругих подвесных проволоочек стремится уравновесить силы механического взаимодействия тока и поля постоянного магнита NS , так что различным силам проходящего через гальванометр тока соответствуют большие или меньшие отклонения рамочки P от первоначального положения. Предварительно произведя так называемую градуировку¹ гальванометра, т. е. определив значения силы тока, соответствующие различным делениям шкалы, мы получаем возможность измерять силу тока непосредственно в амперах.

Итак, тем или иным способом мы можем определить угол поворота рамочки, или, как говорят, отклонение гальванометра, по своей величине соответствующее силе проходящего через гальванометр электрического тока. Это позволяет измерять силу тока при помощи гальванометра. Обычно гальванометры весьма чувствительны и позволяют измерять токи силой в ничтожную долю ампера: порядка одного миллиампера, одного микроампера и даже порядка одной миллионной доли микроампера. Сколь угодно чувствительным гальванометром можно пользоваться и в тех случаях, когда приходится измерять очень сильные токи, но только при этом применяют особую схему (фиг. 56), позволяющую пропускать через гальванометр не весь измеряемый ток, а только некоторую совершенно определенную его часть. Сущность дела заключается в том, что к зажимам гальванометра

¹ Латинское слово «градус» означает «степень», «ступень», «шар»,



Фиг. 56. Схема включения гальванометра с шунтом.

(Г) приключается специально изготовляемое сопротивление, так называемый шунт¹. Сопротивление шунта подбирается обычно весьма небольшое по сравнению с сопротивлением гальванометра, параллельно с ним включенного в общую цепь тока. Благодаря этому главная

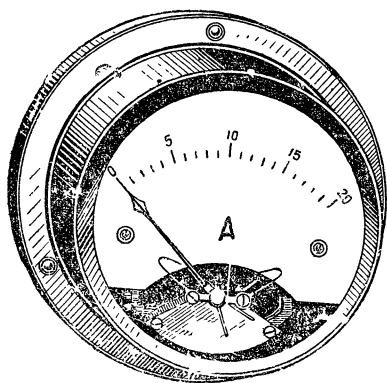
часть тока идет через шунт, и только сравнительно очень малая доля тока (одна тысячная, одна десятитысячная и т. д.) проходит через собственно измерительный прибор — гальванометр. Таким образом можно измерять сколь угодно сильные токи.

Схема, изображенная на фиг. 56, интересна еще в другом отношении. Она показывает, как можно измерять разность потенциалов (напряжение) между какими-либо двумя точками при помощи прибора, подобного только что описанному гальванометру. Если этот прибор обладает сравнительно очень большим сопротивлением, то присоединение его к двум точкам, D_1 и D_2 , некоторой электрической цепи практически не повлияет на разность потенциалов, которая была между этими точками до присоединения измерительного прибора. В то же время сила тока, проходящего при этом через гальванометр и соответственно отклонение гальванометра будут непосредственно зависеть от разности потенциалов между точками D_1 и D_2 . Чем больше разность потенциалов между точками D_1 и D_2 , тем больше сила тока, проходящего через гальванометр Г. Предварительно определив тем или иным способом, какие значения разности потенциалов между точками D_1 и D_2 соответствуют различным отклонениям гальванометра Г, т. е. произведя градуировку его, как вольтметра, можно непосредственно измерять напряжение в вольтах между теми двумя точками электрической цепи, к которым присоединены зажимы рассматриваемого гальванометра.

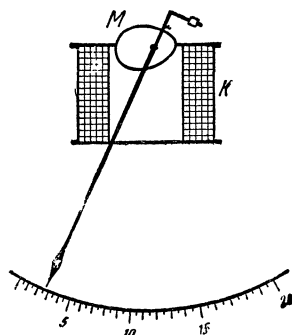
Итак, гальванометр может служить и в качестве амперметра² и в качестве вольтметра. В первом случае, т. е. для измерения силы тока, его обычно снабжают соответствующим шунтом, который иногда помещают внутрь коробки прибора, иногда же, в случае очень больших размеров шунта, прилагают его к основному прибору в качестве необходимой добавочной части (амперметры с внутренним шунтом и амперметры с отдельным шунтом).

¹ Английское слово «шунт» обозначает «ответвление», «ветвь».

² Амперметр — прибор, позволяющий измерять в амперах силу проходящего через него электрического тока.



Фиг. 57. Общий вид амперметра в круглой коробке.



Фиг. 58. Устройство электромагнитного измерительного прибора.

Во втором случае, т. е. для измерения напряжений (разностей потенциалов), стремятся сделать сопротивление прибора как можно больше и иногда, в случае необходимости, присоединяют к нему последовательное дополнительное сопротивление, которое также может располагаться или внутри коробки прибора или вне прибора, в виде особо изготовленной катушки из тонкой изолированной проволоки большого сопротивления.

В электротехнической практике в большом количестве требуются амперметры и вольтметры. При массовом их производстве они оформляются в виде коробки (круглой или прямоугольной) со стеклянной передней крышкой, сквозь которую видна стрелка, перемещающаяся вдоль дугообразной шкалы с делениями, непосредственно указывающими силу тока в амперах или напряжение в вольтах. Внутри коробки, под шкалой, располагаются постоянный магнит и подвижная рамочка, которая в этом случае снабжается осью, поддерживаемой подшипниками. Роль упругих подвесных проволочек при этом играют две бронзовые спиральные пружинки (плоские), окружающие ось вращения рамочки и присоединенные, с одной стороны, к концам обмотки рамочки и, с другой стороны, к неподвижным точкам прибора, электрически связанным с шунтом и с внешней цепью. На фиг. 57 представлен внешний вид подобного амперметра в круглой коробке. Совершенно такой же внешний вид имеют и вольтметры, но только вместо шунтов они снабжаются дополнительными сопротивлениями и их градуировка бывает соответственно иная. Амперметры и вольтметры с неподвижным магнитом и подвижной рамочкой принято называть магнито-

электрическими измерительными приборами.

Более просты по устройству, хотя менее точны, так называемые электромагнитные приборы, состоящие из неподвижной катушки с сравнительно толстой изолированной проволокой (амперметры) или с тонкой проволокой большого сопротивления (вольтметры) и из вращающегося вокруг некоторой оси кусочка мягкого железа той или иной формы (см., например, фиг. 58). Этот кусочек железа M , намагничиваясь током, проходящим по катушке K , стремится затем в большей или меньшей степени, в зависимости от силы тока, расположиться вдоль магнитных линий поля катушки K и втянуться в нее. По этой причине происходит поворот подвижной части прибора, и связанная с ней стрелка показывает по шкале силу проходящего через прибор тока (амперметры) или напряжение, приложенное к зажимам прибора (вольтметры).

В некоторых измерительных приборах используется электродинамическое взаимодействие между двумя катушками, по которым проходит измеряемый ток. Подвижная катушка, связанная с указательной стрелкой, в основном подобна рамочке P гальванометра, изображенного на фиг. 55. Но только в случае электродинамического прибора неподвижное магнитное поле, действующее на подвижную рамочку или катушку, создается не постоянным магнитом, а неподвижной катушкой, по которой проходит измеряемый ток и которая для этой цели в амперметрах и вольтметрах соединяется последовательно с подвижной катушкой. При этом в электродинамических амперметрах совокупное сопротивление обеих катушек стремятся сделать как можно меньше, для чего применяют сравнительно толстую медную проволоку, в электродинамических же вольтметрах это сопротивление делают как можно больше, применяя для этого очень тонкую проволоку и в случае надобности снабжая прибор добавочным сопротивлением.

Наконец, на практике часто применяются так называемые тепловые измерительные приборы, основанные на нагревании проволоки или металлической ленточки, по которой проходит измеряемый ток. Как известно, при нагревании проволока или ленточка будут удлиняться. При помощи соответствующих промежуточных частей это удлинение приводит в движение стрелку, поворачивающуюся вокруг некоторой оси на больший или меньший угол, в зависимости от силы тока, пропускаемого через проволоку или металлическую ленточку.

Для полноты перечня основных электроизмерительных приборов упомянем еще об электростатических вольтметрах, о которых мы уже говорили в § 20 (гл. 2),

48. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ И РАБОТА ТОКА. МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА. ВАТТ, КИЛОВАТТ. КИЛОВАТТ-ЧАС

Как это было в общих чертах разъяснено в § 36, вдоль проводов от источника тока распространяется электрическая энергия (более точно — электромагнитная энергия), за счет которой в различных частях цепи совершается работа электрического тока, выражающаяся в превращениях электрической энергии в другие виды энергии (тепло, механическая работа и т. д.).

Совершенно подобно тому, как работа, совершаемая водой, протекающей по некоторому руслу, выражается произведением количества протекшей воды на высоту падения воды на данном участке водотока, точно так же и работа, совершаемая электрическим током на некотором участке цепи, выражается произведением количества протекшего электричества на падение потенциала вдоль рассматриваемого участка электрической цепи.

Таким образом можем написать:

электрическая работа = количество электричества \times разность потенциалов.

Но мы знаем (см. § 39), что количество электричества, протекшего по цепи, в свою очередь равно произведению силы тока на время, в течение которого это электричество протекло. Следовательно, выражение для электрической работы (работы электрического тока) мы можем представить в таком виде:

электрическая работа = разность потенциалов \times сила тока \times время.

Электрическую работу, совершаемую при разности потенциалов в 1 вольт током в 1 ампер за время в 1 секунду принято, на основании международных соглашений, называть джоулем, в честь английского ученого Джоуля. Следовательно, установлено такое соотношение:

1 джоуль = 1 вольт \times 1 ампер \times 1 секунда.

Вообще же всегда мы имеем:

число джоулей = число вольтов \times число амперов \times число секунд.

На основании сказанного, всякий раз, когда мы желаем выразить в джоулях электрическую работу, совершенную на некотором участке цепи за счет какого-либо источника электрической энергии, мы должны определить в вольтах разность потенциалов (напряжение) между концами данного участка

цепи и помножить ее на силу тока в амперах, а затем полученное произведение еще раз помножить на число секунд, соответствующих тому промежутку времени, в течение которого совершалась искомая электрическая работа.

Особыми исследованиями было установлено, что электрическая работа в один джоуль приблизительно равноценна механической работе в одну десятую килограмметра.

Одна и та же работа, производимая за счет какого-либо источника энергии, может совершаться и очень быстро и очень медленно. При оценке общих условий, в которых производится та или иная работа, имеет большое значение скорость совершения работы, т. е. так называемая *мощность*, с которой источник энергии совершает рассматриваемую работу. Само собой разумеется, что эта скорость совершения работы, или мощность, в условиях неизменности общей обстановки, вполне определяется путем деления всей работы, произведенной за некоторый промежуток времени, на величину этого промежутка времени, т. е. мы можем написать в самом общем виде:

$$\text{мощность} = \frac{\text{работа}}{\text{время}}.$$

Обычно мы выражаем время в секундах. В случае механической работы, выражая всю произведенную работу в килограмметрах и деля их на число секунд, соответствующих времени совершения этой работы, мы получаем мощность, выраженную в килограмметрах в секунду. Так, например, если работа в 1 000 килограмметров равномерно совершалась в течение 10 секунд, то мощность механического двигателя, выполнявшего данную работу, была равна 100 килограмметрам в секунду. В данном случае за единицу мощности мы принимаем один килограмметр в секунду. До последнего времени для выражения мощности механических двигателей (паровых машин, водяных и ветровых двигателей) весьма часто пользуются единицей мощности в 75 раз большей и называемой *лошадиной силой*. Мы имеем, следовательно, такое соотношение:

$$1 \text{ лошадиная сила} = 75 \text{ килограмметров в секунду.}$$

Из всего сказанного выше вытекает, что полная работа, совершенная каким-либо механическим двигателем, равняется произведению мощности этого двигателя на время, в течение которого работа производится. Если, например, мощность паровой машины равна 100 лошадиным силам и она находится в действии в течение одного часа, т. е. в течение 3 600 секунд, то произведенная этой машиной механическая работа будет равна (в килограмметрах):

$$75 \times 100 \times 3\,600 = 27\,000\,000 \text{ килограмметров.}$$

Вообще, следовательно, можно сказать, что произведенная работа равна мощности, помноженной на время выполнения работы, т. е.

$$\text{работа} = \text{мощность} \times \text{время}.$$

Сравнивая это соотношение с приведенным ранее соотношением, определяющим электрическую работу как произведение разности потенциалов на силу тока и на время, нетрудно видеть, что электрическая мощность, расходуемая на некотором участке цепи, должна выражаться произведением разности потенциалов на силу тока, т. е.

$$\text{электрическая мощность} = \text{разность потенциалов} \times \text{сила тока}.$$

Вполне очевидно, что это именно выражение для электрической мощности и должно получиться в результате деления электрической работы на время, в течение которого данная работа произведена.

Действительно:

$$\begin{aligned} \text{электрическая мощность} &= \frac{\text{электрическая работа}}{\text{время}} = \\ &= \frac{\text{разность потенциалов} \times \text{сила тока} \times \text{время}}{\text{время}} = \\ &= \text{разность потенциалов} \times \text{сила тока}. \end{aligned}$$

Электрическую мощность, расходуемую на некотором участке цепи при разности потенциалов между концами этого участка, равной одному вольту, и при силе тока в один ампер, т. е. так называемый вольт-ампер (ва) принято на основании международных соглашений именовать ваттом (вт) в честь английского ученого-механика Ватта¹. Таким образом мы можем написать:

$$1 \text{ ватт} = 1 \text{ вольт} \times \text{ампер} = 1 \text{ вольт-ампер}.$$

Электрическую мощность в 1 000 ваттов называют киловаттом (квт), т. е. имеем следующее соотношение

$$1 \text{ киловатт} = 1\,000 \text{ ваттов}.$$

На основании приведенных выше общих соотношений между работой и мощностью и данных определений джоуля и ватта, мы можем написать:

$$1 \text{ джоуль} = 1 \text{ ватт} \times \text{секунда},$$

$$1 \text{ ватт} = \frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ секунда}}.$$

¹ Ватт (1736—1819) — английский ученый механик, особенно известен как изобретатель паровой машины, значительно более совершенной, чем это удавалось сделать его предшественникам.

т. е. один джоуль равняется одной ватт-секунде, а один ватт — одному джоулю в секунду.

Ввиду того что мощность в один ватт сравнительно мала, в электротехнике весьма часто пользуются киловаттом в качестве единицы мощности. Как было уже указано, один джоуль равноценен приблизительно одной десятой килограммометра. Следовательно, 1 киловатт равноценен приблизительно 100 (точнее 102 калограммометрам) в секунду. Так как мощность в 1 лошадиную силу равна 75 килограммометрам в секунду, то мы видим, что мощность в 1 киловатт больше мощности 1 лошадиной силы приблизительно на одну треть этой последней.

В каждом частном случае, для того чтобы определить электрическую мощность, расходуемую в некоторой части цепи, и выразить ее в киловаттах, необходимо взять произведение напряжения (разности потенциалов) в вольтах между зажимами (концами) данной части цепи на силу тока в амперах и разделить это произведение на одну тысячу, т. е. мы имеем следующее соотношение:

$$\begin{aligned} & \text{мощность (в киловаттах)} = \\ & = \frac{\text{напряжение в вольтах} \times \text{сила тока (в амперах)}}{1000}. \end{aligned}$$

Например, в схеме, представленной на фиг. 43, параллельно соединенные электрические лампы в количестве 20 штук потребляют в сумме ток в 10 амперов при напряжении в 100 вольт. Следовательно, расходуемая лампами электрическая мощность составляет

$$\frac{100 \text{ вольт} \times 10 \text{ ампер}}{1000} = 1 \text{ киловатт}.$$

Если линия передачи питает некоторый промышленный центр электрической энергией при напряжении в 100 000 вольт и при силе тока в 200 амперов, то подаваемая мощность определяется в киловаттах следующим образом:

$$\frac{100\,000 \text{ вольт} \times 200 \text{ ампер}}{1000} = 20\,000 \text{ киловатт}.$$

Подобно тому как для выражения электрической мощности практически обычно пользуются киловаттом вместо слишком малой единицы мощности ватт, и в отношении энергии признано более целесообразным применять вместо джоуля так называемый киловаттчас (квтч), представляющий собой единицу электрической работы (энергии), во много раз большую джоуля. В соответствии с тем что работа или энергия выражается произведением мощности на время, 1 киловатт-

час есть электрическая энергия, расходуемая в цепи при мощности в 1 киловатт в течение 1 часа. Так как 1 час равен 3 600 секунд, то 1 киловатт-час равняется

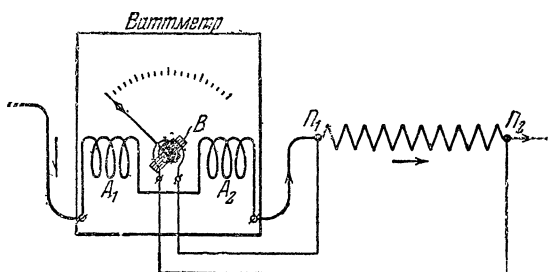
$$1\,000 \text{ ватт} \times 3\,600 \text{ секунд} = 3\,600\,000 \text{ ватт-секунд или джоулей.}$$

Если, например, в рассмотренном выше примере двадцати электрических ламп, расходующих мощность в 1 киловатт, горение ламп продолжается 8 часов в сутки, то, значит, эти лампы потребляют в сутки 8 киловатт-часов электрической энергии.

Если промышленный центр расходует на все свои приемники мощность, равную в среднем 20 000 киловаттов в течение 5 000 часов в год, то полный расход электрической энергии за год составляет

$$20\,000 \text{ киловатт} \times 5\,000 \text{ часов} = 100\,000\,000 \text{ киловатт-часов.}$$

Для измерения мощности, расходуемой различными приемниками электрической энергии, применяются особые приборы, называемые *ваттметрами*. Они обычно строятся подобно электродинамическим амперметрам и вольтметрам (см. § 47), но с той разницей, что неподвижная и подвижная катушки ваттметра не соединяются между собой последовательно, как это делается в амперметрах и вольтметрах, а порознь включаются в цепь по схеме, представленной на фиг. 59. На данной схеме P_1P_2 представляет собой некоторый приемник электрической энергии. Последовательно с этим приемником включается в цепь неподвижная обмотка ваттметра, состоящая из катушки, разделяемой обыкновенно на две равные части — A_1 и A_2 . По неподвижной катушке, изготовляемой из более толстой проволоки, проходит, следовательно, полностью ток, питающий приемник P_1P_2 , и внутри ее создается магнитное поле, соответствующее числу ампер полного тока. В этом поле расположена подвижная катушка B , в общем совершенно подобная подвижной катушке (рамочке) магнитоэлектрического вольтметра и могущая поворачиваться вокруг оси. С этой катушкой связана стрелка ваттметра. Подвижная катушка состоит из большого количества витков тонкой проволоки с большим сопротивлением (иногда применяется добавочное сопротивление) и подключается к концам приемника P_1P_2 совершенно так же, как если бы эта катушка представляла собой вольтметр. Ввиду сравнительно большого сопротивления ветви, содержащей подвижную катушку, проходящим через нее током можно



Фиг. 59. Схема включения ваттметра.

пренебречь. Именно поэтому сила магнитного поля неподвижной катушки $A_1 A_2$ с достаточно большой точностью может быть принята соответствующей току, проходящему через приемник $\Pi_1 \Pi_2$. Благодаря такому способу присоединения ваттметра к приемнику электрической энергии сила механического взаимодействия его подвижной и неподвижной катушек оказывается зависящей от произведения напряжения у зажимов приемника на силу проходящего через него тока. При этом подвижная катушка, удерживавшаяся в своем начальном положении упругими спиральными пружинками, поворачивается на больший или меньший угол в соответствии с величиной мощности, расходуемой приемником $\Pi_1 \Pi_2$. Соединенная с подвижной катушкой стрелка, перемещаясь вдоль шкалы ваттметра, непосредственно показывает расходуемую приемником мощность в ваттах или киловаттах.

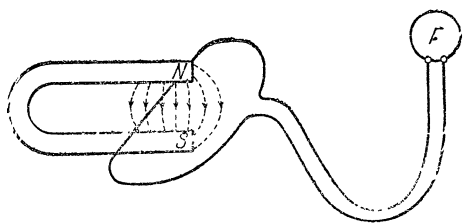
При практическом использовании электрической энергии имеет большое значение более или менее точный учет потребленной энергии. С этой целью применяются особые измерительные приборы, называемые электрическими счетчиками и непосредственно показывающие количество израсходованных киловатт-часов. В основном всякий электрический счетчик, присоединяемый к цепи по схеме ваттметра (фиг. 59), включает в себя очень маленький электродвигатель, скорость вращения которого соответствует расходуемой мощности. Чем больше мощность, тем больше оборотов сделает этот электродвигатель в единицу времени. Таким образом полное число оборотов вращающейся части электрического счетчика за некоторый промежуток времени (месяц, год) дает нам количество киловатт-часов потребленной за это время электрической энергии. Число оборотов учитывается особым счетным механизмом, показания которого и служат для определения полного потребления электрической энергии и для оплаты ее.

49. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

В самом начале этой главы, в § 36, описывая открытое Фарадеем явление электромагнитной индукции, мы совершенно не касались вопроса о том, от каких обстоятельств зависит величина возникающей при этом э. д. с., так называемой индуктированной электродвижущей силы. Мы касались только самых общих условий, в которых обнаруживается появление индуктированного тока. Теперь, познакомившись с целым рядом свойств электрического тока и обстоятельств, имеющих значение при протекании тока по цепи, мы можем сделать дальнейший шаг вперед.

Переходя к рассмотрению закона электромагнитной индукции, т. е. зависимости, определяющей величину индуктированной э. д. с., мы прежде всего обратим внимание на следующее. Представим себе схему основного опыта (фиг. 60). В нашей цепи, замкнутой через гальванометр G , возникает ток, а следовательно, и э. д. с., всякий раз, когда какой-либо участок данной цепи пересекает магнитные линии внешнего поля, образуемого подковообразным магнитом NS . И в то же время изменяется число магнитных линий, охватываемых данной электрической цепью, т. е. изменяется величина магнитного потока, который пронизывает площадку, ограничиваемую контуром проводника. Мы знаем, что всякая электрическая цепь, по которой может проходить ток, и каждая магнитная линия, входящая в состав внешнего магнитного потока, обязательно представляют собой вполне замкнутые, непрерывные контуры (подобные некоторому кольцу или бесконечному ремню). Поэтому совершенно невозможно допустить, чтобы магнитный поток, пронизывающий контур электрической цепи, или, как говорят, с с е п л я ю щ и й с я с этим контуром, увеличивался или уменьшался на некоторое количество магнитных линий и чтобы при этом как раз такое же количество магнитных линий не пересекало электрическую цепь, входя или выходя из ее контура (фиг. 60). Таким образом всегда количество магнитных линий, пересекающих в некотором направлении контуром электрической цепи, в точности равно соответствующему изменению магнитного потока, сцепляющегося с данным контуром.

В связи с этим весьма важным положением, установленным



Фиг. 60. Схема основного опыта с электромагнитной индукцией. В цепь включен гальванометр.

Максвеллом, при выводе количественных соотношений которым подчиняется явление индуктирования э. д. с., мы будем иногда говорить об изменении магнитного потока сквозь данный проводящий контур как об условии возникновения электромагнитной индукции. Это часто оказывается удобным в практическом отношении.

Из работ Фарадея непосредственно вытекает следующий основной закон электромагнитной индукции:

Величина индуктированной электродвижущей силы вполне определяется скоростью пересечения магнитных линий контуром электрической цепи.

На основании сделанного выше замечания о полном соответствии числа магнитных линий, пересеченных контуром электрической цепи, и изменения магнитного потока, сцепляющегося с данным контуром, можно представить закон электромагнитной индукции в следующем виде:

Величина электродвижущей силы, индуктируемой в некоторой цепи, вполне определяется скоростью изменения магнитного потока, сцепляющегося с контуром данной цепи.

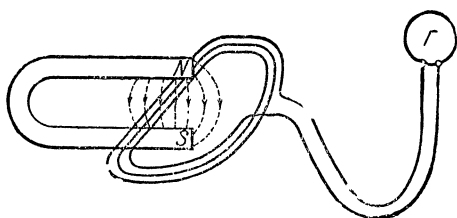
Приведенные два выражения одного и того же закона электромагнитной индукции по существу своему вполне тождественны, но только в первом из них внимание сосредоточено непосредственно на первопричине явления, а именно — на пересечении магнитных линий определенным контуром электрической цепи, во втором же речь идет об изменениях магнитного потока, сцепляющегося с данным контуром. Это представляет собой лишь естественное следствие упомянутой первопричины.

Вольт, являющийся так называемой практической электромагнитной единицей электродвижущей силы (и разности потенциалов), был установлен, исходя как раз из основного закона электромагнитной индукции. Именно, *вольт представляет собой электродвижущую силу, индуктируемую в цепи, когда магнитный поток, пронизывающий контур этой цепи, равномерно изменяется со скоростью одного вебера в секунду.*

Таким образом, например, для получения индуктированной э. д. с. в 100 вольтов необходимо, чтобы магнитный поток, пронизывающий контур данной электрической цепи, равномерно изменялся со скоростью, равной ста веберам в секунду.

Опыт обнаруживает большие трудности в осуществлении значительных по величине магнитных потоков, могущих своим изменением индуктировать в простом контуре (одном витке) необходимые в области электротехники большие электродвижущие силы. Обычно, не идя в сторону чрезмерного увеличения магнитного потока, применяют вместо одного

целый ряд (иногда десятки тысяч) витков одной и той же проволоки, охватывающих один и тот же практически небольшой магнитный поток. При изменении этого магнитного потока в каждом из витков будет индуцироваться более или менее незначительная электродвижущая сила,



Фиг. 61. Основной опыт с электромагнитной индукцией. В области внешнего магнитного потока расположено три витка.

но так как все витки соединены между собой последовательно, то небольшие э. д. с. каждого отдельного витка складываются одна с другой, и при достаточно большом числе витков в сумме может получиться необходимая по своей величине э. д. с. На фиг. 61 представлена схема опыта с электромагнитной индукцией, в основном подобная той, которая изображена на фиг. 60, но только в данном случае вместо одного витка, пронизываемого потоком магнита NS , взято три витка. Благодаря этому при движении витков поперек поля магнита в цепи гальванометра Γ будет индуцироваться э. д. с. в три раза большая, чем это было при том же магните в схеме фиг. 60.

50. САМОИНДУКЦИЯ

Есть много случаев электромагнитной индукции, когда бывает довольно трудно проследить, где и как именно происходит пересечение магнитных линий контуром данной электрической цепи, но сравнительно легко видеть, что магнитный поток, пронизывающий контур электрической цепи, претерпевает те или иные изменения во времени. При этом, конечно, всегда возникает индуцированная э. д. с. В таких случаях, при общем описании наблюдаемого явления, а также при выводе соответствующих количественных соотношений, проще всего основываться на той форме закона электромагнитной индукции, в которой речь идет как раз об изменениях магнитного потока, охватываемого контуром электрической цепи. Пример подобного случая электромагнитной индукции, обычно называемый явлением с а м о и н д у к ц и и, мы теперь и рассмотрим.

Как известно, электрический ток всегда сопровождается магнитным полем в пространстве вокруг проводника, по которому проходит ток. Магнитные линии этого поля со всех сторон охватывают проводник (фиг. 28—31). На фиг. 31 с особой отчетливостью видно, что эти магнитные линии в совокупности образуют собственный магнитный поток рассмат-

риваемого тока, пронизывающий контур данного тока и сцепляющийся с ним. Собственный магнитный поток всякого электрического тока принято называть потоком самоиндукции, потому что изменения величины этого потока сопровождаются индуктированием в самой цепи тока добавочной э. д. с., так называемой электродвижущей силы самоиндукции.

Если внешняя э. д. с., действовавшая в какой-либо цепи, перестает существовать, ток в этой цепи не прекращается мгновенно, но в течение некоторого промежутка времени еще поддерживается за счет э. д. с. самоиндукции. Данная э. д. с. возникает вследствие того, что при прекращении внешней э. д. с. ток также стремится прекратиться и при этом ослаблении тока непрерывно изменяется магнитный поток самоиндукции, постепенно убывающий вместе с током. В конце концов и ток и поток самоиндукции окончательно исчезают. Промежуток времени, в течение которого совершенно прекращается ток в некоторой замкнутой цепи после исчезновения действовавшей в ней основной э. д. с., сильно зависит от величины магнитного потока самоиндукции. В случае, когда отдельные части проводника не образуют витков и возможно теснее сближены одна с другой, а в непосредственном соседстве с проводником нет железа, поток самоиндукции имеет сравнительно незначительную величину, и ток может прекратиться в течение ничтожной доли секунды. Но если проводник, образующий цепь тока, так сказать, развернут и при этом охватывает возможно большую площадь, или если данный проводник образует ряд витков, охватывающих один и тот же поток самоиндукции, в особенности, если внутрь этих витков внесен железный сердечник, — мы будем иметь дело с большой самоиндукцией, и энергичные проявления э. д. с. самоиндукции могут в течение нескольких секунд поддерживать в цепи ток, непрерывно все же убывающий после прекращения действия основной э. д. с.

Может возникнуть вполне законный вопрос о том, за счет какого же источника энергии поддерживается ток в цепи после прекращения действия основной э. д. с. Для решения данного вопроса необходимо вспомнить о том, что каждый магнитный поток безусловно всегда является носителем энергии магнитного поля. Об этом мы уже говорили в § 35 (гл. 3). За счет именно этого запаса энергии и поддерживается ток, когда исчезает основная э. д. с., причем ток длится до тех пор, пока до конца не исчерпается энергия магнитного потока самоиндукции.

Итак, всякое ослабление электрического тока, естественно связанное с уменьшением потока самоиндукции, сопровождается появлением э. д. с. самоиндукции, стремящейся под-

держат убывающий ток, т. е. имеющей в цепи то же направление, что и ранее действовавшая э. д. с.

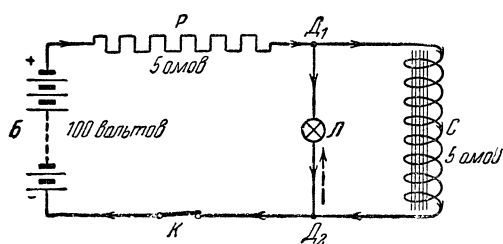
Обратное явление наблюдается при установлении тока в цепи, когда, например, цепь эта замыкается. С появлением тока возникает и магнитный поток самоиндукции. На образование этого потока и на накопление связанного с ним запаса энергии требуется время. Следовательно, поток самоиндукции и соответствующий электрический ток не могут мгновенно установиться и достигнуть своего наибольшего значения, определяемого величиной действующей в цепи основной э. д. с. и электрическим сопротивлением цепи. Непрерывно возрастающий поток самоиндукции возбуждает в цепи э. д. с. самоиндукции, которая в данном случае оказывается направленной обратно основной э. д. с., т. е. обратно тому, что было во время прекращения тока. Именно благодаря этой обратной электродвижущей силе самоиндукции и задерживается нарастание тока, которое происходит тем медленнее, чем больше самоиндукция цепи. В конце концов ток и поток самоиндукции достигнут своего наибольшего, т. е. окончательного, значения, а вместе с тем исчезнет и обратная э. д. с. самоиндукции, которая существовала только до тех пор, пока имели место изменения потока самоиндукции.

Обобщая изложенное, мы должны придти к следующему заключению:

Поток самоиндукции, являющийся носителем запаса электромагнитной энергии в любой электрической цепи, всегда как бы стремится сохранить неизменной свою величину.

При всяком изменении силы тока и связанного с ним потока самоиндукции, этот последний противодействует происходящему изменению. В случае усиления тока и нарастания потока самоиндукции появляется обратная э. д. с. самоиндукции, противодействующая основной э. д. с. (возникшей или увеличивающейся). В случае ослабления тока и уменьшения потока самоиндукции появляется э. д. с. самоиндукции, действующая в том же направлении, что и основная э. д. с. (исчезающая или убывающая). Итак, *действие потока самоиндукции всегда проявляется в запаздывании изменений тока в цепи относительно соответствующих изменений основной э. д. с.*

Все описанные явления очень отчетливо обнаруживаются, например, в следующем опыте (фиг. 62). Ток от какого-либо генератора постоянного тока — в данном примере от аккумуляторной батареи *Б* — при помощи некоторого выключателя *К* может замыкаться через реостат *Р* на две ветви, параллельно включенные между точками *Д*₁ и *Д*₂. В первой из этих двух ветвей помещена лампочка накаливания *Л*, имею-



Фиг. 62. Схема опыта для исследования явлений самоиндукции.

говоришь, с большой индуктивностью. Для достижения этого применяется очень много витков проволоки, и внутрь катушки вставляется железный сердечник. Допустим теперь, что э. д. с. аккумуляторной батареи равна 100 вольтам и что сопротивления реостата P и катушки с самоиндукцией C составляют по 5 омов каждое. Сравнительно слабым током, ответвляющимся через лампочку накаливания L , а также малым сопротивлением аккумуляторной батареи B мы можем пренебречь при приближенных подсчетах. Таким образом несомненно ожидать, что после замыкания тока выключателем K и после окончательного установления этого тока сила его в рассматриваемой основной цепи ($KBPD_1CD_2K$) будет приблизительно равна, согласно закону Ома,

$$\frac{100 \text{ вольтов}}{5 \text{ омов} + 5 \text{ омов}} = 10 \text{ амперам},$$

причем падение напряжения вдоль проводника образующего катушку C , т. е. разность потенциалов между точками D_1 и D_2 , будет составлять

$$5 \text{ омов} \times 10 \text{ амперов} = 50 \text{ вольтов}.$$

Если лампочка взята стовольтовая, то при напряжении в 50 вольтов нить ее не будет накаливаться достаточно сильно и останется темной. В то же время ток через лампочку будет идти в направлении от точки D_1 к точке D_2 , как показано сплошными стрелками на фиг. 62.

Допустим затем, что мы внезапно разомкнули выключатель K , т. е. прекратили действие основной э. д. с. (аккумуляторной батареи) в рассматриваемой сложной цепи. При этом сохраняется замкнутой выделенная теперь цепь, содержащая катушку с большой самоиндукцией C и лампочку накаливания L , т. е. цепь $D_1CD_2LD_1$. Благодаря большой самоиндукции катушки C , ток через эту катушку не прекратится сразу же после прерывания цепи аккумуляторной батареи, но за счет энергии магнитного потока самоиндукции

шая сравнительно большое сопротивление и потребляющая возможно меньший ток (малосветная лампа, скажем, на 5 или 10 свечей). Во второй ветви располагается катушка C с большой самоиндукцией или, как принято иногда

будет в течение некоторого промежутка времени поддерживаться, идя через катушку C в том же направлении (фиг. 62, сплошные стрелки). И этот ток, возбуждаемый э. д. с. самоиндукции, должен будет замыкаться через лампочку накаливания L , причем направление тока через лампочку от D_1 к D_2 сменится теперь на обратное, т. е. от D_2 к D_1 , показанное на фиг. 62 пунктирной стрелкой. Наличие тока, идущего через катушку C , после перерыва K делается совершенно очевидным, так как после перерыва K лампочка накаливания L ярко вспыхивает и даже может перегореть. Дело в том, что благодаря быстрому убыванию потока самоиндукции, связанного с катушкой C , возникающая в ней э. д. с. самоиндукции оказывается очень большой и в начале может превышать много сот вольт. Мало-помалу, однако, эта э. д. с. уменьшается, в связи с чем яркость лампочки L быстро падает и, перейдя через состояние слабого каления, она, наконец, померкнет. Ток в цепи $D_1CD_2LD_1$ еще некоторое время продолжается, непрерывно слабея, до полного своего прекращения.

Совершенно очевидно, что все тепло, выделившееся в лампочке накаливания после размыкания выключателя K , образовалось за счет запаса энергии, носителем которой был магнитный поток самоиндукции.

Рассмотрим теперь, что произойдет в схеме, изображенной на фиг. 62, непосредственно после замыкания выключателя K . Если бы ток, идущий через две параллельные ветви, приключенные к точкам D_1 и D_2 и содержащие лампочку накаливания L и катушку C , мгновенно устанавливался, то напряжение между точками D_1 и D_2 , несомненно, сразу устанавливалось бы и ни на момент не превышало бы 50 вольт. В действительности же, дело происходит следующим образом. Благодаря ничтожной самоиндукции ветви, содержащей лампочку L , ток в этой ветви может чрезвычайно быстро устанавливаться. Но ветвь, содержащая катушку C , обладает очень большой самоиндукцией. На образование потока самоиндукции путем постепенного притока энергии от основного генератора (аккумуляторной батареи B) необходим заметный промежуток времени, в течение которого обратная э. д. с. самоиндукции противодействует основной, внешней относительно катушки C , э. д. с. и препятствует току от батареи B проходить через катушку. Благодаря этому напряжение между точками D_1 и D_2 в момент включения цепи достигает почти 100 вольт и лампочка L более или менее ярко вспыхивает.

Итак, вследствие наличия большой индуктивности в ветви, содержащей катушку C , лампочка L , остающаяся темной в условиях установившегося тока, в моменты замыкания и

размыкания выключателя K кратковременно загорается. При этом в момент замыкания лампочка светит сравнительно слабо, а в момент размыкания — очень ярко.

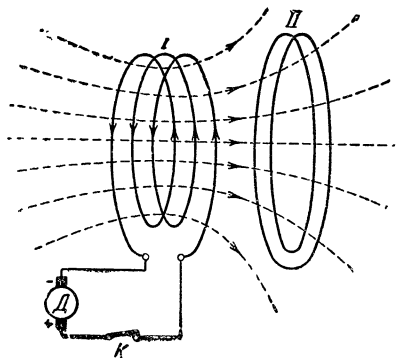
51. ВЗАИМНАЯ ИНДУКЦИЯ

Рассмотрим две цепи I и II , расположенные одна около другой (фиг. 63). Допустим, что по цепи I проходит электрический ток от некоторого генератора, например, от динамомашины D . Этот ток, конечно, сопровождается магнитным потоком самоиндукции. Вообще говоря, часть потока самоиндукции цепи I будет пронизывать и контур цепи II , как показано пунктирными линиями на фиг. 63. Так как всякие изменения тока в первой (или, как ее часто называют, *первичной*) цепи будут через посредство изменяющегося магнитного потока индуцировать э. д. с. во второй (или *вторичной*) цепи, то принято называть *потоком взаимной индукции* ту часть потока самоиндукции первичной цепи, которая пронизывает контур вторичной цепи и как бы связывает взаимно эти две цепи. Вместе с тем принято называть *электродвижущей силой взаимной индукции* ту электродвижущую силу, которая индуцируется во вторичной цепи вследствие изменений *первичного тока*.

Описываемое явление с полным правом называется *явлением взаимной индукции*, так как первичная и вторичная цепи могут поменяться ролями: электрический ток может быть возбужден во вторичной цепи, и в таком случае всякое изменение вторичного тока вызывает появление э. д. с. силы взаимной индукции в первичной цепи. При этом замечательно следующее обстоятельство: *одна и та же скорость изменения тока в любой из двух данных цепей вызывает*

появление одной и той же (по величине) электродвижущей силы взаимной индукции в другой цепи.

Явление взаимной индукции широко используется в электротехнической практике в тех случаях, когда оказывается необходимым перенести энергию переменного электрического тока из одной цепи в другую без посредства прямой проводниковой связи между ними. Для этой цели располагают две обмотки возможно

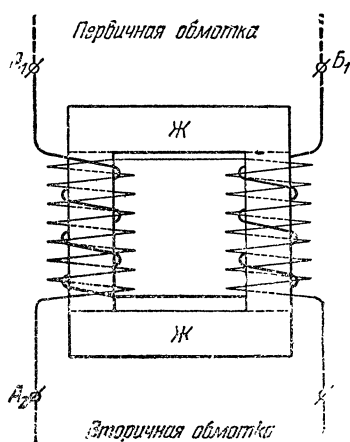


Фиг. 63. Первичная и вторичная цепи, в которых обнаруживается явление взаимной индукции.

ближе одну к другой так, чтобы магнитный поток, создаваемый любой из этих двух обмоток, возможно полное сцеплялся с витками другой. Требуемая наибольшая электромагнитная связь между первичной и вторичной обмотками обычно достигается применением общего железного сердечника, который окружается витками обеих обмоток. В зависимости от числа витков в рассматриваемых обмотках, во вторичной обмотке может индуцироваться э. д. с., во много раз большая или меньшая той, которая имеется в первичной цепи. Таким образом происходит преобразование электрической энергии, которой мы располагаем в одной (первичной) цепи, в электрическую энергию в другой (вторичной) цепи. Подобного рода устройства называются **т р а н с ф о р м а т о р а м и**¹.

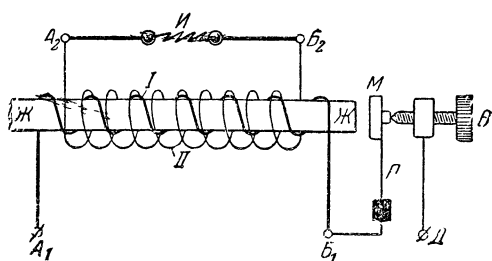
На фиг. 64 в общих чертах представлена схема трансформатора переменного тока. Здесь ЖЖ изображает железный сердечник в виде четырехугольной рамы, в большинстве случаев составляемой из собранных в пакеты полос листового железа. A_1 и B_1 — концы (зажимы) первичной обмотки, A_2 и B_2 — концы (зажимы) вторичной обмотки. Витки этих обмоток, обычно тщательно изолированные, по возможности равномерно располагаются вокруг основных железных стержней, из которых составлен сердечник. Совершенно очевидно, что переменный ток, проходящий по первичной обмотке, возбуждает изменяющийся магнитный поток в общем железном сердечнике и индуцирует так называемую **в т о р и ч н у ю** электродвижущую силу в другой обмотке. Зажимы первичной обмотки присоединяются, например, к проводам, подающим электрическую энергию от генераторов переменного тока, а зажимы вторичной обмотки присоединяются к проводам, по которым энергия направляется дальше к приемникам.

Особую разновидность трансформатора представляет собой **и н д у к ц и о н н а я к а т у ш к а**, часто называемая ка-



Фиг. 64. Общая схема трансформатора.

¹ Латинское слово «трансформо» обозначает «преобразовываю»



Фиг. 65. Схема катушки Румкорфа.

тушкой Румкорфа¹. Простейшее устройство такой катушки схематически показано на фиг. 65. ЖЖ — сердечник, обычно составляемый из железных проволок. На этот сердечник намотаны первичная и вторичная обмотки (I и II).

Первичная содержит сравнительно небольшое количество витков толстой проволоки, вторичная же обмотка изготовляется из значительно более тонкой проволоки и содержит очень большое число витков. Это делается для получения во вторичной обмотке больших э. д. с., порядка десятков и сотен тысяч вольт. А₁ и В₁ — зажимы первичной обмотки, последовательно с которой включается так называемый прерыватель. Изображенный на фиг. 65 прерыватель состоит из плоской пружины П, прочно закрепленной у одного конца и несущей железный якорь М на другом конце. Этот якорь, располагаемый против одного из полюсов намагничиваемого железного сердечника ЖЖ, присоединяется к зажиму В₁ первичной обмотки. Ток, прошедший по первичной обмотке через пружину П, проходит в конец неподвижного винта В, соприкасающегося с якорем и соединенного с зажимом Д. Если приключить к зажимам А₁ и Д какой-либо генератор постоянного тока, например аккумуляторную батарею, то ток пройдет по всей первичной цепи, причем железный сердечник ЖЖ намагнитится и притянет к себе якорь М. Но в этот момент цепь первичного тока прервется в месте контакта подвижного якоря и неподвижного винта В. Вследствие этого первичный ток на время прекратится, сердечник ЖЖ размагнитится, и якорь М отойдет в первоначальное положение, т. е. придет в контакт с винтом В. Ток снова замкнется, сердечник ЖЖ опять намагнитится, якорь М притянется и т. д. Колебательное движение якоря между концом многократно намагничиваемого железного сердечника ЖЖ и контактным винтом В будет поддерживаться все время, пока зажимы А₁ и Д остаются приключенными к батарее. Периодические прерывания первичного тока сопровождаются возбуждением очень большой э. д. с. во вторичной обмотке.

¹ Румкорф (1803—1877) — известный механик и электротехник, изобретатель ряда приборов.

Зажимы этой обмотки (A_2 и B_2) присоединяются к соответствующему приемнику, требующему высокого напряжения, например, к трубке с разреженным газом или к разряднику, через промежуток которого проскакивают искры I (фиг. 65).

52. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

В современном электроэнергетическом хозяйстве, при генерировании, передаче и потреблении электрической энергии, в большинстве случаев применяется переменный электрический ток, т. е. такой ток, направление которого в данной цепи все время изменяется. Это вызвано целым рядом причин. Главнейшие причины таковы:

Во-первых, как это было уже отмечено в § 38, при помощи электромагнитных генераторов, которые оказываются наиболее экономичными и потому имеют особо существенное значение, нет возможности, не прибегая к специальным переключателям ток приспособлениям, непрерывно возбуждать во внешней цепи ток постоянного направления. В основном это связано с тем обстоятельством, что мы не можем непрерывно, сколь угодно долго, увеличивать магнитный поток, сцепляющийся с неизменяемым контуром некоторой электрической цепи. Как бы мы ни осуществляли длительное движение проводника во внешнем магнитном поле, например, путем вращения контура проводника вокруг некоторой оси, увеличение магнитного потока, охватываемого данным неизменяемым контуром, возможно только до известного предела, после чего этот магнитный поток при дальнейшем движении проводника неизбежно должен уменьшаться и, достигнув нулевого значения, может затем возрастать в другом направлении до некоторого наибольшего возможного значения, после чего в свою очередь начнет уменьшаться и т. д. Благодаря этому в данном подвижном контуре проводника будет индуцироваться изменяющаяся по величине и направлению э. д. с., т. е. так называемая переменная электродвижущая сила. Таким образом, наиболее простыми по своему устройству электромагнитными генераторами являются генераторы переменного тока.

Во-вторых, при применении переменного тока, пользуясь трансформаторами (см. предыдущий параграф), можно легко преобразовывать ток, переводя электрическую энергию из одной цепи в другую, и при этом получать очень большие э. д. с., т. е. так называемые высокие напряжения, что оказывается весьма выгодным при передаче электрической энергии по проводам на далекие расстояния (см. гл. 6).

Для полного понимания дальнейшего необходимо сделать следующее замечание. В каждой электрической цепи, в про-

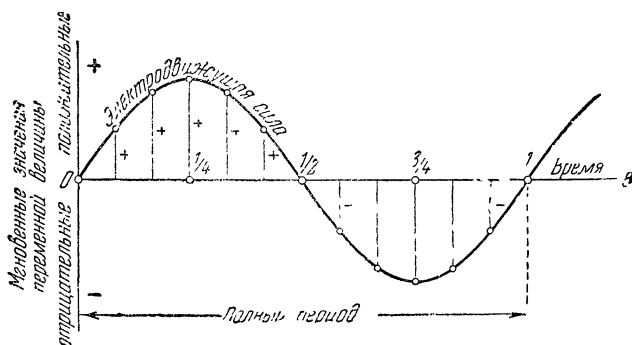
воднике, образующем рассматриваемую цепь, мы принимаем некоторое произвольное направление за положительное направление, а обратное направление — за отрицательное направление. Ток, протекающий в положительном направлении, мы будем считать положительным, а ток обратного направления — отрицательным. Соответственно этому и э. д. с. мы будем считать положительной или отрицательной в зависимости от того, в какую сторону она направлена. Таким образом различные мгновенные значения э. д. с. и тока могут быть в случае переменных токов как положительными, так и отрицательными, что обычно и отмечается знаками $+$ и $-$.

Итак, переменный ток и возбуждающая его переменная же э. д. с. непрерывно изменяются по своей величине и по направлению. Начинаясь от нуля, они непрерывно возрастают в направлении, условно принимаемом за положительное для данной цепи, и, наконец, достигают предельного наибольшего значения называемого амплитудой¹ тока, или амплитудой электродвижущей силы. Иногда амплитуды тока и э. д. с. называют максимумами² их мгновенных значений, изменяющихся между определенными в каждом частном случае пределами. Достигнув своих максимальных мгновенных значений, электродвижущая сила и ток начинают уменьшаться по своей величине и, перейдя через нулевое значение, начинают увеличиваться в обратном (отрицательном) направлении, достигая в конце концов максимальных отрицательных значений. Направленные в отрицательную сторону электродвижущая сила и ток в свою очередь затем уменьшаются по величине и опять делаются равными нулю. После этого снова, сколь угодно долго, повторяется описанный ряд изменений э. д. с. и тока, последовательно приобретающих всевозможные положительные и отрицательные значения, лежащие в пределах между положительным и отрицательным максимумами, обычно имеющими одно и то же численное значение. Подобного рода изменения электродвижущей силы и тока вообще называются их колебаниями.

Время полного колебания, т. е. промежутки времени, в течение которого повторно изменяющаяся величина последовательно проходит весь ряд своих возможных значений как положительных, так и отрицательных, принято называть полным периодом, или, сокращенно, периодом.

¹ Латинское слово «амплитудо» значит «возвышенность», «обширность».

² Слово «максимум» на латинском языке значит «самое большое» и вообще употребляется для обозначения наибольшего значения любой изменяющейся величины.



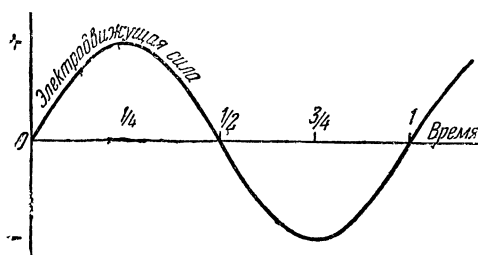
Фиг. 66. Построение кривой, изображающей электро-
движущую силу в цепи переменного тока.

Число, показывающее, сколько полных периодов укладывается в промежуток времени, равный одной секунде, называется частотой. Следовательно, частота измеряется числом полных периодов в секунду. Так, например, частота переменного тока, обычно применяемая в энергоснабжающих системах СССР и во всей Европе, равна 50 периодам в секунду. В Америке же нашли распространение три частоты: в 25, 50 и 60 периодов в секунду. В последнее время, на основании международного соглашения, единице частоты, т. е. одному периоду в секунду, присвоено наименование герц, по имени немецкого ученого Герца¹. Таким образом, пользуясь этим новым наименованием единицы частоты, мы можем сказать, что в технике применяется переменный ток с частотами в 25, 50 и 60 герцев.

Совершенно очевидно, что при частоте в 50 герцев полный период переменного тока равен одной пятидесятой доле секунды и, соответственно, при частотах в 25 и 60 герцев период равен одной двадцать пятой и одной шестидесятой секунды.

При описании и изучении явлений переменного тока бывает очень удобно изображать изменяющиеся во времени токи или электродвижущие силы при помощи некоторых кривых, которые строятся таким образом, что в каждый данный момент времени на чертеже ясно видно, каково мгновенное значение той или иной переменной величины. На фиг. 66 представлено подобное построение кривой э. д. с. Вдоль горизонтальной прямой OB откладывается время от начала O вправо. Отрезок OI изображает время полного периода.

¹ Герц (1857—1894) — немецкий ученый, обогативший физическую науку своими открытиями. Особенно известны его работы в области электромагнитных колебаний, положившие начало современной радиотехнике.



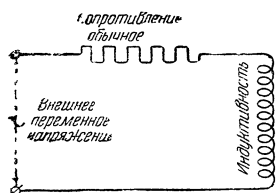
Фиг. 67. Кривая электродвижущей силы.

Точка $1/4$ своим расстоянием от начала O определяет промежуток времени, равный четверти периода. Точки $1/2$ и $3/4$ таким же образом обозначают половину и три четверти периода. В этом смысле любая точка горизонтальной прямой

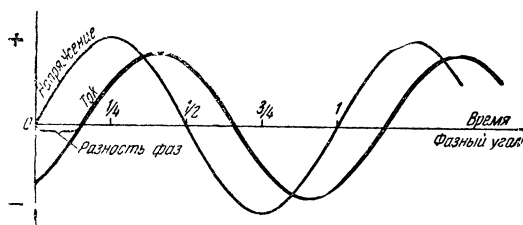
OB (оси времен) обозначает какой-либо момент времени, которому соответствует некоторое мгновенное значение рассматриваемой переменной величины, в данном случае — переменной электродвижущей силы. От различных точек оси времен откладываем вверх и вниз, т. е. вертикально, прямые линии, своей длиной условно изображающие мгновенные значения переменной величины. Вверх откладываем положительные значения, а вниз — отрицательные. Такие прямые линии, точнее сказать — прямые отрезки, мы можем построить для всех точек оси времен. Концы всех этих отрезков, взятые в совокупности, образуют собой некоторую кривую линию, изображенную на фиг. 66. Следовательно, мы можем сказать что кратчайшие расстояния отдельных точек кривой, построенной описанным способом, от оси времен условно изображают мгновенные значения переменных величин для соответствующих моментов времени. Обычно принято при построении подобных кривых не наносить на чертеж только что указанных вертикальных отрезков, и в таком случае изображение изучаемой переменной величины приобретает более простой вид (фиг. 67). Пользуясь фиг. 66 и 67, можно весьма отчетливо проследить все описанные выше последовательные изменения э. д. с. Совершенно очевидно, что таким же образом можно строить и кривые переменного тока.

При дальнейшем изучении явлений, происходящих в цепях переменного тока, и при рассмотрении соотношений между э. д. с. и током, бывает очень полезно строить кривые э. д. с. и тока на одном и том же чертеже. При этом взаимное расположение данных кривых будет в значительной степени зависеть от свойств цепи переменного тока.

В огромном большинстве встречающихся на практике случаев цепь переменного тока обладает довольно значительной индуктивностью (самоиндукцией). Как было разъяснено в § 50, влияние индуктивности (самоиндукции) сказывается в том отношении, что благодаря ей всякие изменения тока запаздывают относительно изменений возбуждаю-



Фиг. 68. Цепь переменного тока, содержащая индуктивность.

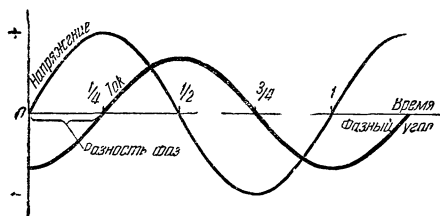


Фиг. 69. Кривые напряжения и тока. Ток запаздывает относительно внешнего напряжения.

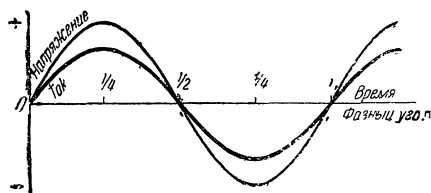
ещей ток э. д. с. В связи с этим в цепях с индуктивностью переменный ток достигает максимального значения несколько позже, чем основная э. д. с. или внешнее переменное напряжение, приложенное к зажимам данной цепи (фиг. 68).

Соответствующие кривые переменного напряжения и тока представлены на фиг. 69, на которой ясно показано описываемое запаздывание тока относительно внешнего напряжения (э. д. с.): ток переходит через нулевые значения, а также достигает положительных и отрицательных максимальных значений позже, чем возбуждающее его внешнее напряжение. Соотношение переменного напряжения и тока (во времени) всегда бывает таково, если только основные свойства цепи определяются ее индуктивностью. Запаздывание тока относительно внешнего напряжения (или основной э. д. с.) достигает наибольшего возможного значения, равного $\frac{1}{4}$ полного периода (фиг. 70) в случае, когда индуктивность цепи чрезвычайно велика, а сопротивление этой цепи (обычное или так называемое омическое сопротивление) ничтожно мало. В этом предельном случае переменный ток проходит через нулевое значение в те моменты времени, когда внешнее напряжение достигает максимума (положительного или отрицательного), и наоборот, ток приобретает максимальное значение, когда напряжение проходит через нуль. В другом предельном случае, когда индуктивность цепи ничтожно мала, а омическое сопротивление имеет сравнительно большое значение, запаздывание изменений тока относительно изменений напряжения (электродвижущей силы) практически исчезает, т. е. ток и напряжение в одни и те же моменты времени проходят через нулевые и через максимальные значения (фиг. 71).

Переменное напряжение и ток в различные моменты времени принято описывать при помощи их так называемой



Фиг. 70. Кривые напряжения и тока. Ток запаздывает относительно внешнего напряжения на $1/4$ полного периода.

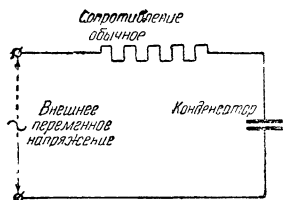


Фиг. 71. Кривые [напряжения и тока. Ток и внешнее напряжение достигают нулевых и максимальных значений в одни и те же моменты времени.

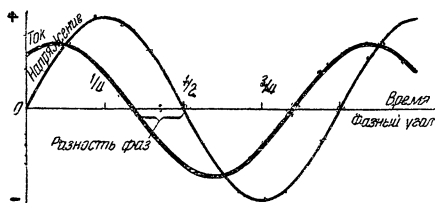
ф а з ы¹, которая в данном случае представляет собой некоторый условно вводимый переменный угол, равномерно возрастающий с течением времени. Происхождение понятия о фазном угле можно связывать с тем обстоятельством, что в обычных электромагнитных генераторах переменного тока применяется непрерывное и равномерное вращение одной части машины относительно другой. Именно углом поворота этой части от некоторого начального положения, по существу, и определяется мгновенное значение напряжения э. д. с. и тока. Ввиду сказанного на фиг. 69, 70, 71

и т. п. по горизонтальной оси вместо времени можно откладывать фазные углы, соответствующие различным его моментам, и считать ось времени также осью фазных углов. Это надлежащими надписями и показано на упомянутых рисунках. Согласно принятому условию, времени полного периода соответствует угол одного полного оборота некоторого воображаемого генератора. В отличие от того, что время мы всегда считаем вдоль горизонтальной оси от одного и того же начала, обозначаемого на рисунках точкой O , численное значение фазного угла той или иной переменной величины мы должны отсчитывать вправо от первой точки, соответствующей нулевому значению данной величины. Таким образом, фазы напряжения и тока в случаях, изображенных на фиг. 69 и 70, различны. Между ними, как говорят, существует разность фаз. Вообще при построении кривых переменного напряжения и тока (фиг. 69, 70, 71) разность фаз изображается отрезком оси фазных углов, лежащим между ближайшими точками перехода через нулевое значение двух сравниваемых переменных величин. В связи с этим мы

¹ Слово «фа́за» происходит от греческого слова «фа́зис» — «вид», «видимость», «кажущееся» — и обозначает определенное состояние какого-либо переменного явления.



Фиг. 72. Цепь переменного тока, содержащая емкость.



Фиг. 73. Кривые напряжения и тока. Изменения тока опережают изменения внешнего напряжения.

можем сказать, что в случае, представленном на фиг. 71, разность фаз между током и напряжением равна нулю. В случаях же, когда более или менее значительно сказывается влияние индуктивности в цепи переменного тока, разность фаз не равна нулю, что и показано на фиг. 69 и 70 соответствующими надписями.

В цепях переменного тока разность фаз между током и напряжением может возникать не только благодаря индуктивности. Существуют и некоторые другие причины, могущие вызвать появление подобной разности фаз. Оказывается, например, что если цепь переменного тока содержит в себе электрическую емкость (см. § 23, гл. 2) между отдельными частями проводников или, что еще проще, если в цепь включен электрический конденсатор последовательно с другими частями цепи (фиг. 72), то переменный ток, как и в случае индуктивности (фиг. 68), будет отличаться по фазе от напряжения. Однако, в случае емкости изменения тока будут опережать изменения внешнего напряжения. Это и показано на фиг. 73, где кривая тока сдвинута влево от кривой напряжения. В случае же индуктивности в цепи, как мы видели (фиг. 69 и 70), кривая тока сдвинута относительно кривой напряжения вправо.

Итак, в цепях переменного тока влияния индуктивности (самоиндукции) и емкости прямо противоположны. В связи с этим оказывается возможным путем надлежащего подбора величины индуктивности и емкости добиться того, что в цепи переменного тока влияния индуктивности и емкости взаимно уравниваются или, как принято говорить, взаимно компенсируются¹. В условиях полной компенсации индуктивности (самоиндукции) и емкости разность фаз тока и внешнего напряжения делается равной нулю. В отношении взаимного расположения кривых тока и внешнего напряжения такая скомпенсированная цепь пере-

¹ Латинское слово «компэнсо» обозначает «уравнивающую».

менного тока уподобляется цепи, состоящей из чисто омического сопротивления (фиг. 71).

В данном случае сила тока в цепи достигает наибольшего возможного значения при данном напряжении и омическом сопротивлении. Происходящие при этом в цепи явления называются явлениями резонанса¹. Дело в том, что во всякой цепи, содержащей индуктивность и емкость, возникает переменный электрический ток, если предварительно зарядить конденсатор и затем соединить концы цепи накоротко, т. е. непосредственно, и если при этом омическое сопротивление цепи невелико. Возникает так называемый колебательный разряд конденсатора, обычно непрерывно ослабевающий или, как говорят, затухающий, в связи с существованием потерь энергии в цепи (главным образом в связи с нагреванием проводника). Если бы потерь энергии совсем не было, то возникший переменный ток колебательного разряда не прекращался бы. Время полного периода таких незатухающих электрических колебаний зависит только от величины индуктивности и емкости. Оказывается, что условия резонанса в цепи, содержащей индуктивность и емкость, достигаются всякий раз, когда период собственных незатухающих колебаний в данной цепи делается равным периоду внешней э. д. с., действующей в этой цепи. Цепь, так сказать, легко откликается на воздействия внешней вынуждающей э. д. с. Говорят: цепь резонирует. При этом напряжения у концов той части цепи, которая обладает индуктивностью, и у зажимов конденсатора достигают иногда чрезмерно больших значений.

Для правильного понимания кривых тока и напряжения, изображенных в наиболее простом виде на фиг. 69—73 и т. п., необходимо иметь в виду, что после момента включения цепи переменный ток в огромном большинстве случаев не сразу приобретает характер, представленный на этих фигурах. Вначале кривая тока имеет значительно более сложный вид и даже не имеет периодического характера, т. е. различные мгновенные значения силы тока в дальнейшем не повторяются в той же последовательности. Лишь по истечении некоторого промежутка времени (обычно — долей секунды) устанавливается периодически изменяющийся ток установившегося режима², длящегося

¹ Латинское слово «резонанс» значит «отзываться», «откликаться», «повторять».

² Французское слово «режим» применяется в техническом языке для обозначения общих условий работы или действия какого-либо устройства. Так говорят о режиме работы центральной электрической станции, о режиме работы электродвигателя, о режиме движения по железной дороге и т. п.

затем сколь угодно долго. Общий вид кривых тока и напряжения, представленных на фиг. 69—73, относится именно к установившемуся режиму, который в обычной практике переменного тока отличается одинаковой формой участков кривой, соответствующих полупериодам, как положительным, так и отрицательным (над осью времен и под осью времен). Строя эти кривые, мы совершенно отбрасываем те кратковременные явления, которые имеют место в цепи переменного тока непосредственно после момента включения, т. е. обычно не обращаем внимания на явления не установившегося режима. В огромном большинстве случаев эти явления не имеют существенного значения, и только в особо исключительных случаях с ними приходится серьезно считаться.

В обычной практике для измерения силы переменного тока и величины переменного напряжения (э. д. с.) принято прибегать к определению их некоторых средних значений, называя их действующими значениями, а именно:

Действующей силой переменного тока называется сила такого постоянного тока, который может выделить в данном проводнике столько же тепла за некоторый промежуток времени, как и переменный ток в течение того же промежутка времени.

Действующим значением напряжения (электродвижущей силы) в цепи переменного тока называется такое постоянное значение напряжения (электродвижущей силы), под влиянием которого в некоторой цепи, практически не обладающей индуктивностью и емкостью, может выделяться в течение определенного промежутка времени столько же тепла, как и в случае переменного напряжения (переменной электродвижущей силы).

В качестве приборов, служащих для определения действующих значений переменного тока и напряжения, весьма удобны тепловые измерительные приборы (см. § 47), шкалы которых градуируются в цепях постоянного тока. Тепловые приборы дают искомые действующие значения силы тока и напряжения, когда их включают в цепь переменного тока. Это прямо вытекает из вышеприведенных основных определений того, что является действующей силой переменного тока и действующим переменным напряжением. Оказывается, далее, что такими же свойствами обладают и электродинамические измерительные приборы (амперметры и вольтметры), а также электростатические вольтметры. Все эти электроизмерительные приборы весьма пригодны для измерений в цепях переменного тока. Однако, ввиду большой простоты и сравнительной дешевизны, для измерений действующих значений переменного тока и напряжения очень часто на

практике пользуются и электромагнитными приборами (амперметрами и вольтметрами), но только в приборах этого рода шкалы должны быть особо градуированы для переменного тока и кроме того для некоторой строго определенной частоты, так как показания их до известной степени зависят от частоты переменного тока.

Описанные в § 47 магнитоэлектрические приборы с неподвижным постоянным магнитом и подвижной рамочкой, по которой идет ток, непригодны для измерения переменного тока, так как эта рамочка за время одного полупериода будет стремиться повернуться в одну сторону, а за время другого полупериода — в обратную сторону. Вследствие своей недостаточной подвижности рамочка не успевает за время полупериода, т. е. практически за очень малый промежуток времени, заметно отклониться в ту или иную сторону, ввиду чего при переменном токе стрелка подобного прибора обычно лишь слегка дрожит около своего начального положения. Магнитоэлектрические приборы годятся только для измерения постоянного тока и постоянного напряжения.

Что касается мощности переменного тока, то ее мгновенное значение изменяется в очень широких пределах. Между прочим мгновенное значение мощности делается равным нулю, когда становится равным нулю хотя бы один из множителей, ее определяющих—сила тока или напряжение (фиг. 69, 70, 71 и 73). Практически, при измерении мощности переменного тока, обычно говорят о средней мощности его. Рассмотренный выше, в § 48, ваттметр вполне годится для определения средней мощности переменного тока и при этом включается в цепь по схеме, представленной на фиг. 59 применительно к постоянному току. Оказывается, однако, что средняя мощность переменного тока равняется произведению трех множителей. Первые два множителя — действующее напряжение и действующая сила тока. В этом отношении мы имеем нечто, вполне подобное выражению мощности постоянного тока (см. § 48). Третий же множитель, зависящий от величины разности фаз тока и напряжения, носит название *косинуса фи*¹, или *коэффициента*² *мощности*.

¹ «Косинус фи» есть математическое выражение, представляющее собой величину, в известных пределах тем меньшую, чем больше угол разности фаз, обычно обозначаемый греческой буквой «фи» (φ).

² Слово «коэффициент» происходит от латинского слова «эффициэнс» — «производящий», «влекущий за собой». Приставка «ко» обозначает совместное действие, соединение. Принято называть коэффициентом множитель, входящий в состав более или менее сложного соотношения и рассматриваемый в качестве величины, неизменной при некоторых определенных условиях.

Таким образом в случае переменного тока мы имеем следующее соотношение:

средняя мощность = действующее напряжение \times действующая сила тока \times коэффициент мощности.

Величина коэффициента мощности (косинуса ϕ) может иметь весьма различные значения в пределах от нуля до единицы, в соответствии с различными возможными значениями угла разности фаз (ϕ). Если разность фаз равна нулю (фиг. 71), коэффициент мощности равняется единице, и мы имеем:

средняя мощность = действующее напряжение \times действующая сила тока.

В другом предельном случае, когда разность фаз соответствует отставанию переменного тока от напряжения на четверть периода (фиг. 70, влияние большой индуктивности) или когда ток опережает напряжение на четверть периода (большое влияние емкости), коэффициент мощности равняется нулю, и мы имеем:

средняя мощность = 0.

Во всех промежуточных случаях (например, фиг. 69) коэффициент мощности бывает больше нуля и меньше единицы. Обычно при использовании энергии переменного тока всеми мерами стремятся к тому, чтобы коэффициент мощности был возможно ближе к единице.

Итак, простое произведение вольтов на амперы в случае переменного тока еще, вообще говоря, не дает действительной мощности. В этом отношении, следовательно, существует большое отличие от того, что имеет место в цепях постоянного тока. Поэтому при рассмотрении цепей переменного тока необходимо строго различать число вольт-амперов от числа ваттов, или число киловольт-амперов от числа киловаттов. Вообще же мы имеем:

число киловаттов = число киловольт-амперов \times коэффициент мощности.

Как мы указали выше (§ 51), трансформаторы переменного тока получили широкое распространение благодаря тому, что при их помощи низкое напряжение легко преобразуется в высокое, и обратно. Законы этого преобразования очень просты. Дело в том, что переменный магнитный поток, создаваемый переменным током в железном сердечнике трансформатора (фиг. 64), индуцирует в первичной и вторичной обмотках тем большие э. д. с., чем больше витков в каждой из этих обмоток. Электродвижущая сила, индуцируемая в

первичной обмотке, является обратной э. д. с. по отношению к внешнему переменному напряжению, приложенному к первичным зажимам трансформатора. Первичное внешнее напряжение должно преодолевать эту обратную э. д. с. и практически почти равно ей по численной величине. Электродвижущая сила, индуцируемая во вторичной обмотке, практически почти равная напряжению у вторичных зажимов трансформатора, является по существу основной э. д. с., действующей в электрической цепи, приключенной ко вторичной обмотке. В связи со сказанным, *действующее напряжение у зажимов вторичной обмотки приблизительно так относится к действующему напряжению у зажимов первичной обмотки, как число витков вторичной обмотки относится к числу витков первичной обмотки, т. е.*

$$\frac{\text{действующее вторичное напряжение}}{\text{действующее первичное напряжение}} = \frac{\text{число вторичных витков}}{\text{число первичных витков}}.$$

Частное от деления числа вторичных витков на число первичных витков принято называть коэффициентом трансформации.

Таким образом, мы можем написать:

$$\text{коэффициент трансформации} = \frac{\text{число вторичных витков}}{\text{число первичных витков}}.$$

Если коэффициент трансформации больше единицы, то вторичное напряжение будет больше первичного, и мы имеем повысительный трансформатор. Если же коэффициент трансформации меньше единицы, то вторичное напряжение будет меньше первичного, и мы имеем понижающий трансформатор.

Когда трансформатор работает при полной нагрузке, т. е. когда действующая сила вторичного тока имеет наибольшее значение, на которое рассчитан данный трансформатор, то оказывается, что *действующая сила вторичного тока приблизительно так относится к действующей силе первичного тока, как число витков первичной обмотки относится к числу витков вторичной обмотки, т. е. силы вторичного и первичного токов связаны между собой соотношением, обратным тому, которое мы имеем для вторичного и первичного напряжений. Мы можем, следовательно, написать:*

$$\frac{\text{действующая сила вторичного тока}}{\text{действующая сила первичного тока}} = \frac{\text{число первичных витков}}{\text{число вторичных витков}}.$$

Таким образом в повысительных трансформаторах вторичное напряжение получается большее, а вторичная сила тока — меньшая, чем в первичной обмотке. В понизительных же трансформаторах вторичное напряжение получается меньшее, а вторичная сила тока большая, чем в первичной обмотке. Все рассмотренные свойства трансформаторов оказываются очень полезными при передаче и распределении электрической энергии (см. гл. 6).

В заключение скажем еще несколько слов о так называемых токах Фуко¹ или вихревых токах, возникающих в сплошных массах металла, сквозь которые проходит переменный или, вообще говоря, изменяющийся магнитный поток. В подобных сплошных массах металла можно представить себе разнообразные, совершенно замкнутые контуры, охватывающие изменяющийся магнитный поток. В таком случае в этих замкнутых контурах, обладающих практически очень небольшим сопротивлением, индуктируются токи, сила которых обычно бывает весьма велика. В связи с указанным в сплошных массах металла, подвергающихся воздействию изменяющегося магнитного потока, нерсдко выделяется значительное количество джоулева тепла, что обычно является совершенно непроизводительной тратой энергии. Во избежание этих потерь энергии на токи Фуко принято делать сердечники трансформаторов переменного тока, катушек Румкорфа и т. п. не сплошными, а составными из отдельных, более или менее изолированных одна от другой железных проволок или полос тонкого железа, располагаемых в направлении магнитного потока. Таким образом достигаются перерывы в массах металла, что затрудняет возникновение сильных токов Фуко, и благодаря этому значительно уменьшаются потери, вызываемые этими токами. Необходимо заметить, что в железных сердечниках, сквозь которые проходит переменный магнитный поток, кроме потерь на токи Фуко, наблюдаются еще потери, связанные с тем, что вообще всякое перемагничивание железа само по себе сопровождается некоторым расходом энергии. Таким образом так называемые железные потери в трансформаторах, т. е. потери энергии в их железных сердечниках, слагаются из потерь на токи Фуко (вихревые токи) и из потерь на перемагничивание.

¹ Фуко (1819—1868)—французский физик. Занимался различными вопросами физики, главным образом в области света. В истории электротехники известен своими исследованиями явлений в сплошных массах металла при прохождении сквозь него изменяющегося магнитного потока.

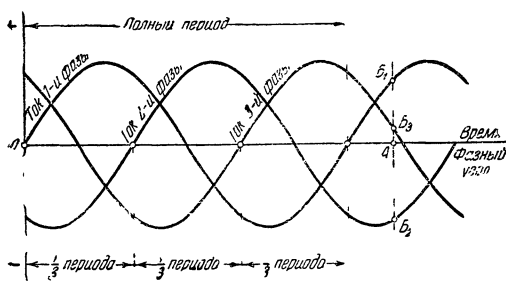
53. ТРЕХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

При передаче и распределении электрической энергии переменным током (см. гл. 6), а также в ряде других случаев, оказывается выгодным пользоваться не простым переменным током, основные свойства которого были рассмотрены в предыдущем параграфе, но более сложной совокупностью нескольких переменных токов, отличающихся друг от друга по фазе, т. е. неодновременно проходящих через нулевое значение и неодновременно достигающих максимума. Эти токи разных фаз обычно образуют единое целое, и проводники, по которым они идут, бывают связаны между собой. Из всех различных возможностей на практике особенное распространение получил так называемый трехфазный переменный ток или просто трехфазный ток, представляющий собой совокупность трех переменных токов одной и той же частоты, отстающих друг от друга на $\frac{1}{3}$ полного периода. Для возбуждения подобных трех токов в соответствующих трехфазных генераторах (см. § 55, гл. 5) индуктируются три переменные э. д. с., также отстающие одна от другой на $\frac{1}{3}$ полного периода, т. е. так же отличающиеся одна от другой по фазе, как и возбуждаемые ими три переменных тока. При этом обычно предполагают, что амплитуды всех трех токов тождественны, а также тождественны и амплитуды трех э. д. с.

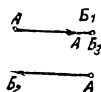
На фиг. 74 представлены в виде кривых три переменных тока, отстающих друг от друга на $\frac{1}{3}$ полного периода: ток 1-й фазы, ток 2-й фазы и ток 3-й фазы. Действующие одновременно, они составляют трехфазный ток.

Ток каждой отдельной фазы представляет собой по всем своим свойствам обычный переменный ток, который по этой причине часто называют однофазным переменным током, или сокращенно просто однофазным током.

Одно из самых важных свойств трехфазного тока, имеющее большое практическое значение, заключается в том, что в каждый данный момент времени сумма мгновенных значений, входящих в его состав трех переменных токов, равна нулю. Этими словами на математическом языке выражается, что сумма положительных мгновенных значений каких-либо двух токов в некоторый данный момент времени численно равна мгновенному отрицательному значению третьего тока или что мгновенное положительное значение одного тока численно равно сумме отрицательных мгновенных значений двух других токов. В справедливости этого положения можно убедиться путем рассмотрения на фиг. 74 мгновенных значений токов 1-й, 2-й и 3-й фаз для некоторого произвольно



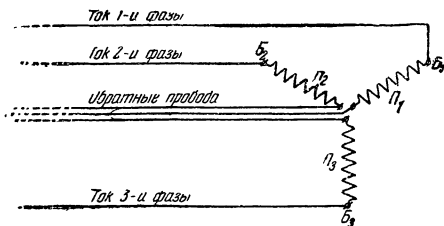
Фиг. 74. Кривые трехфазного тока. Токи первой, второй и третьей фаз.



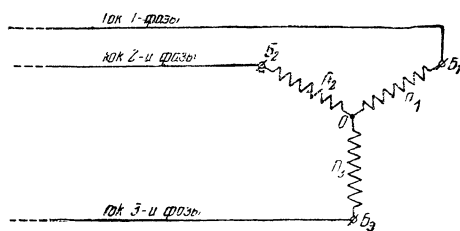
Фиг. 75. Сложение мгновенных значений токов первой и третьей фаз и сопоставление этой суммы с мгновенным значением тока второй фазы.

выбранного момента времени, обозначенного точкой A на оси времен, и соответствующего сопоставления этих мгновенных значений. В данном примере токи 1-й и 3-й фаз будут иметь положительные мгновенные значения, изображаемые отрезками AB_1 и AB_3 . Ток 2-й фазы будет иметь отрицательное мгновенное значение, изображаемое отрезком AB_2 . Нетрудно видеть, что, складывая отрезки AB_1 и AB_3 , как это показано на фиг. 75, мы получим общий отрезок такой же длины, как и отрезок AB_2 . Подобное же соотношение получается и для любого иного положения точки A на оси времен.

Представим себе теперь, что рассматриваемый трехфазный ток подается к каким-либо трем приемникам электрической энергии Π_1 , Π_2 и Π_3 (фиг. 76) по трем проводам, присоединенным к их зажимам B_1 , B_2 и B_3 , и затем, пройдя через эти приемники, возвращается к генератору по соответствующим трем обратным проводам. На основании сказанного выше должны прийти к заключению, что в каждый момент времени положительные и отрицательные токи, проходящие по обратным проводам в противоположных направлениях, должны, так сказать, уравнивать друг друга в отношении всяких внешних проявлений, если эти обратные провода тесно сближены, как это показано на фиг. 76. Если же три обратных провода слить воедино, то в полученном общем обратном проводе совсем не должно быть тока, потому что в каждый данный момент времени в нем будет как бы накладываться друг на друга равные по величине и про-



Фиг. 76. Полная схема приемной части трехфазной цепи (с обратными проводами).



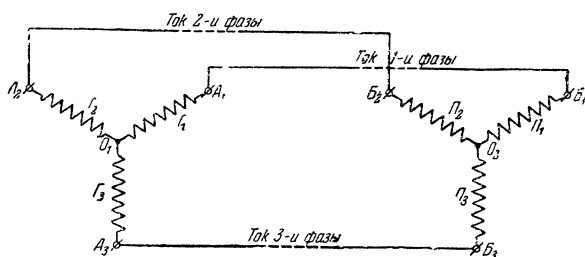
Фиг. 77. Схема соединения приемников трехфазного тока звездой (без обратного провода).

тивоположные по направлению токи: положительный и отрицательный, каждый из которых может оказаться суммой двух положительных или отрицательных токов каких-либо двух фаз. Так должно быть. На самом деле это и наблюдается. В этом именно

и заключается смысл утверждения, что сумма мгновенных значений трех токов, составляющих трехфазный ток, всегда равна нулю. Но если сила тока в общем обратном проводе в случае трехфазного тока обычно равна нулю, то отсюда следует, что такой провод совершенно не нужен и можно обойтись без него, как это и показано на фиг. 77. Здесь три приемника, P_1 , P_2 и P_3 , соединены друг с другом в одной общей точке O , которая называется нейтральной или нулевой точкой, а провода, подводящие трехфазный ток, как и в предыдущей схеме, присоединены к зажимам B_1 , B_2 и B_3 . Такое соединение приемников трехфазного тока называется соединением звездой.

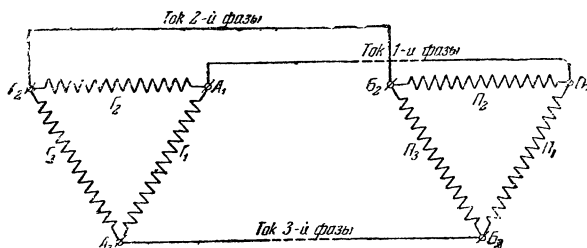
На основании данных выше разъяснений о сложении мгновенных значений отдельных составляющих трехфазного тока, совершенно очевидно, что токи, протекающие через три приемника — P_1 , P_2 и P_3 (фиг. 77), идут далее через нейтральную точку O , причем ток, прошедший, например, через приемник P_1 , разветвляется после точки O через приемники P_2 и P_3 , или токи, прошедшие, например, через приемники P_1 и P_2 , сливаются затем в точке O и, соединившись, протекают через приемник P_3 и т. п.

В связи с тем, что при соединении приемников трехфазного тока звездой отсутствует общий обратный провод, в электромагнитных генераторах трехфазного тока так называемые обмотки генератора (три обмотки), состоящие из витков проволоки, в которых индуктируются основные э. д. с. также могут быть соединены звездой. Это и представлено на фиг. 78, где буквами G_1 , G_2 и G_3 обозначены три генераторные обмотки, в которых индуктируются три э. д. с., остающиеся одна от другой на $1/3$ периода. Эти генераторные обмотки соединены между собой в одной общей точке O_1 , а внешние их зажимы A_1 , A_2 и A_3 при помощи проводов 1-й, 2-й и 3-й фаз присоединены к зажимам B_1 , B_2 и B_3 приемников, P_1 , P_2 и P_3 , также имеющих общую точку O_2 .



Фиг. 78. Соединение генераторных обмоток и приемников трехфазного тока по схеме: звезда—звезда.

Кроме соединения звездой, в практике применяется еще так называемое соединение треугольником (фиг. 79), при котором конец первой генераторной обмотки Γ_1 в точке A_1 соединяется с началом второй генераторной обмотки Γ_2 , конец этой второй обмотки в точке A_2 соединяется с началом третьей генераторной обмотки Γ_3 , а конец ее в точке A_3 соединяется с началом первой генераторной обмотки Γ_1 . Таким образом, обмотки трехфазного генератора образуют вполне замкнутый треугольник. Точно так же могут быть соединены между собой и три приемника Π_1 , Π_2 и Π_3 . Наконец, зажимы генератора A_1 , A_2 и A_3 соединяются проводами 1-й, 2-й и 3-й фаз с зажимами B_1 , B_2 и B_3 совершенно так же, как и в схеме, представленной на фиг. 78. То обстоятельство, что при соединении генераторных обмоток Γ_1 , Γ_2 и Γ_3 треугольником эти обмотки образуют самостоятельную замкнутую цепь $A_1\Gamma_2A_2\Gamma_3A_3\Gamma_1A_1$, в которой действуют три индуцируемые э. д. с., могущие, казалось бы, возбудить в данной замкнутой цепи вредные сильные токи, не имеющие никакого прямого отношения к полезным токам, идущим от трехфазного генератора к приемникам, — это обстоятельство, само по себе не представляет какой-либо опасности. Дело

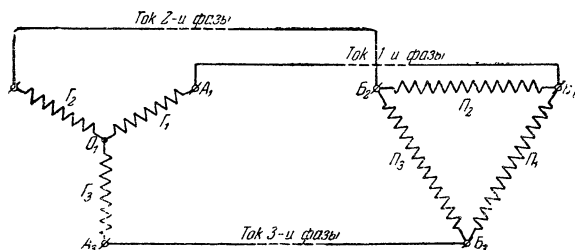


Фиг. 79. Соединение генераторных обмоток и приемников трехфазного тока по схеме: треугольник—треугольник.

в том, что к рассматриваемым трем э. д. с., отстающим одна от другой на $1/3$ периода, в полной мере относится все, сказанное выше о сложении мгновенных значений токов, составляющих трехфазный ток. Таким образом мгновенные положительные и отрицательные значения трех э. д. с., индуцируемых в отдельных генераторных обмотках G_1 , G_2 и G_3 , которые образуют замкнутый треугольник (фиг. 79), всегда взаимно уравниваются, так что в сумме получается всегда для замкнутой цепи генератора э. д. с., равная нулю. Вследствие этого в данной цепи не возникает никакого излишнего местного тока, помимо токов, выходящих наружу по проводам, присоединенным к зажимам A_1 , A_2 и A_3 . Что касается токов, подводимых к приемным зажимам B_1 , B_2 и B_3 (фиг. 79), то они в каждый данный момент времени соответственным образом разветвляются через приемники Π_1 , Π_2 и Π_3 , приключенные треугольником к этим зажимам, и при этом по трем приемникам протекают переменные токи, опять же запаздывающие друг относительно друга на $1/3$ периода.

Кроме рассмотренных соединений звезда—звезда (фиг. 78) и треугольник—треугольник (фиг. 79) в практике часто применяют так называемое смешанное соединение. Можно, например, в трехфазном генераторе соединить обмотки звездой, а приемники соединить треугольником. Получается соединение звезда—треугольник (фиг. 80). Можно поступить и наоборот: генераторные обмотки соединить треугольником, а приемники—звездой. Получается соединение треугольник—звезда.

Что касается трансформаторов, которыми пользуются для преобразования напряжения в цепях трехфазного тока, то в этом отношении можно идти двумя путями. Всегда есть полная возможность использовать три обычных трансформатора простого переменного тока, т. е. группу из трех так называемых однофазных трансформаторов. Их первичные и вторичные обмотки соединяются с каждой стороны по схеме звезды или треугольника в зависимости от обстоя-



Фиг. 80. Смешанное соединение генераторных обмоток и приемников трехфазного тока по схеме: звезда—треугольник.

тельств. Иногда же строят специальный трехфазный трансформатор, железная основа которого состоит из трех отдельных сердечников, расположенных рядом и перекрытых по концам общим железным ярмом. На каждый из этих сердечников накладываются первичная и вторичная обмотки одной из трех фаз. Все три первичные обмотки, а также и вторичная, соединяются звездой или треугольником. В некоторых особых случаях оказывается полезным подразделять вторичные обмотки на части, которые соединяются между собой более сложным способом.

При измерении мощности трехфазного тока мы встречаемся с теми же, по существу, обстоятельствами, что и при измерении мощности простого однофазного переменного тока (см. § 52). В случае одинаковой нагрузки каждой фазы, т. е. при одинаковой средней мощности, потребляемой каждым из трех приемников (к чему всеми мерами стремятся), мощность трехфазного тока можно считать равной утроенной средней мощности, потребляемой в любой отдельной фазе. Замечательно при этом следующее. В рассматриваемых условиях одинаковых нагрузок всех трех фаз, или, как говорят, в случае уравновешенной трехфазной системы¹, мгновенная мощность трехфазного тока, равная сумме мгновенных мощностей, потребляемых каждым из трех приемников, неизменно сохраняет свою величину, т. е. является постоянной, чего нельзя сказать о мгновенной мощности однофазного переменного тока. В связи с этим средняя мощность трехфазного тока в случае уравновешенной системы равна его мгновенной мощности в любой момент времени, и мы можем говорить просто о мощности трехфазного тока.

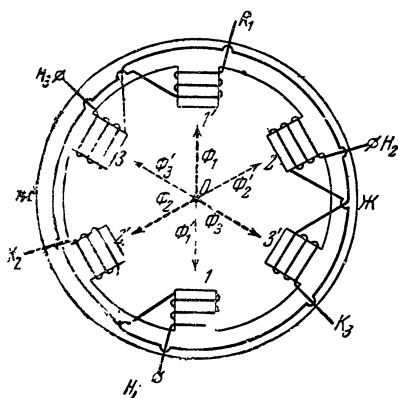
Итак, можем написать:

Мощность трехфазного тока = 3 × действующее напряжение у зажимов одного приемника × действующая сила тока в приемнике × коэффициент мощности в цепи приемника.

Практически очень часто бывает удобнее выражать мощность трехфазного тока через действующее напряжение между двумя любыми передающими ток проводами и через действующую силу тока в одном из проводов. Тогда, оказывается, можно следующим образом представить мощность трехфазного тока (с достаточной для обычных целей точностью):

мощность трехфазного тока = $I^2 \frac{1}{4}$ × действующее напряжение между двумя проводами × действующая сила тока в проводе × коэффициент мощности в цепи приемника.

¹ Греческое слово «сυσтеμα» обозначает «стройное целое», «составленное из многих частей».



Фиг. 81. Схема для получения вращающегося магнитного поля.

Приведенные выражения для мощности трехфазного тока справедливы, совершенно независимо от того, как именно соединены приемники — звездой или треугольником.

Для измерения мощности трехфазного тока, а также для учета энергии, потребляемой в цепях трехфазного тока, применяются ваттметры и электрические счетчики, которые в основном подобны соответствующим приборам, описанным уже в § 48, но только они включаются в цепь более сложным путем.

Остановимся еще на одном весьма важном для практики свойстве многофазных систем, т. е. систем с несколькими переменными токами, различающимися по фазе. В частности, рассмотрим это свойство применительно к трехфазному току, с которым мы в общих чертах ознакомились в настоящем параграфе. Речь идет о так называемом вращающемся магнитном поле, на применении которого основано устройство наиболее распространенных электродвигателей, пригодных для питания от цепей трехфазного тока и обычно называемых трехфазными двигателями.

Сущность явления вращающегося магнитного поля заключается в следующем. Представим себе (фиг. 81) кольцевое железное ярмо ЖЖ, на котором с внутренней стороны размещены три пары железных же сердечников: 1 — 1', 2 — 2', 3 — 3'. Каждая пара сердечников снабжена самостоятельной обмоткой, по которой можно пропускать ток для их намагничивания. Начала и концы этих трех обмоток обозначены буквами — H_1K_1 , H_2K_2 и H_3K_3 . Если пропустить постоянный ток только по первой обмотке в направлении от H_1 к K_1 , между полюсами 1 и 1' возникнет магнитное поле в направлении, показанном на рисунке толстой стрелкой Φ_1 . Если таким же образом пропустить постоянный ток только по второй обмотке от H_2 к K_2 , между полюсами 2 и 2' возникнет магнитное поле в направлении Φ_2 . Наконец, при пропускании постоянного тока только по третьей обмотке от H_3 к K_3 , между полюсами 3 и 3' возникнет магнитное поле в направлении Φ_3 . Допустим теперь, что с описанным устройством делается такой опыт. По очереди пропускаем через рассмотренные обмотки постоянный ток то в направлении

от H к K , то от K к H , в порядке, указанном в прилагаемой таблице, где кроме того в последнем столбце отмечается, какая толстая или тонкая стрелка дает направления получающегося при этом магнитного поля или магнитного потока.

Из последнего столбца таблицы ясно видно, что при указанных в ней последовательных пересоединениях (или, как говорят, переключениях) постоянного тока направление магнитного поля между шестью полюсами $1—1'$, $2—2'$ и $3—3'$ будет скачкообразно изменяться, все время как бы поворачиваясь на $1/6$ полного оборота, притом в одну и ту же сторону (в данном случае—против часовой стрелки). Оказывается, что подобное же изменение направления магнитного поля будет происходить не скачкообразно, а в значительной степени равномерно, если через данные три обмотки пропускать не постоянный ток (в надлежащей последовательности), а переменный трехфазный ток, отдельные составляющие которого последовательно достигают своего максимального значения (положительного или отрицательного). Таким образом можно получить подлинно вращающееся магнитное поле, причем в случае шестиполюсного устройства, изображенного на фиг. 81, магнитное поле будет поворачиваться на один полный оборот за время полного периода. Следовательно, при частоте в 50 герцев магнитное поле будет вращаться со скоростью 50 оборотов в секунду. Всё это имеет большое практическое значение.

С целью приключения рассматриваемых трех обмоток к цепи трехфазного тока их необходимо соединить одну с другой по схеме звезды или треугольника. Если мы примем, например, схему звезды, то надо концы обмоток K_1 , K_2 и K_3 соединить вместе, а к зажимам H_1 , H_2 и H_3 подвести три провода трехфазного тока. Пользуясь кривыми, изображенными на фиг. 74, нетрудно проследить, что токи 1-й, 2-й и 3-й фаз, протекающие соответственно через 1-ю, 2-ю и 3-ю обмотки, достигают своих максимальных значений (положительных или отрицательных) именно в той последовательности, как это указано в вышеприведенной таблице. Вместе с тем то обстоятельство, что переменные токи изменяются плавно, а не скачкообразно, как это было бы при последовательных переключениях постоянного тока, имеет следствием

№ обмотки	Направление постоянного тока	Направление магнитного поля и потока
1	От H_1 к K_1	Φ_1
3	K_3 H_3	Φ'_3
2	H_2 K_2	Φ_2
1	K_1 H_1	Φ'_1
3	H_3 K_3	Φ'_3
2	K_2 H_2	Φ'_2

плавное же изменение направления магнитного поля. При трехфазном токе магнитное поле в действительности вращается.

Если в пространство, занятое вращающимся магнитным полем, внести железный цилиндр, имеющий возможность вращаться вокруг своей оси, располагаемой поперек магнитных линий этого поля, и если на такой цилиндр наложены витки из хорошо проводящей проволоки так, чтобы вращающееся магнитное поле могло их пронизывать, то в этих витках будут возникать сильные индуктированные токи. Кроме того в самой массе железного цилиндра могут возникать более или менее сильные токи Фуко. Все эти индуктированные токи будут механически взаимодействовать с вращающимся магнитным полем, стремясь как бы затормозить его вращение (см. закон Ленца, § 46). И обратно, вращающееся магнитное поле, воздействуя механически на токи, индуктированные в железном цилиндре и в его обмотке, стремится увлечь этот цилиндр во вращение. Таким именно способом и осуществляется простейший по своему устройству электродвигатель трехфазного тока (трехфазный электродвигатель).

Приложение к главе четвертой

В следующей таблице даны обозначения главнейших единиц, служащих для измерений в области электротехники.

Название единицы	Обозначение		Что измеряется этой единицей
	русское	международное	
Ампер	а	A	Сила тока
Вольт	в	V	Электродвижущая сила (разность потенциалов)
Киловольт	кв	kV	То же (1 000 в)
Ом	ом	Ω	Электрическое сопротивление
Мегом	мгом	M Ω	То же (1 000 000 ом)
Кулон (ампер-секунда) . .	к	C	Количество электричества
Ампер-час	а-ч	Ah	То же (3 600 к)
Ватт	вт	W	Мощность
Киловатт	квт	kW	То же (1 000 вт)
Джоуль (ватт-секунда) . .	дж	J	Работа
Киловатт-час	квт-ч	kWh	То же (3 600 000 дж)
Максвелл	мкс	M	Магнитный поток
Вебер	вб	Wb	То же (100 000 000 мкс)
Гаусс	ге	G	Магнитная индукция
Эрстед	э	Oe	Магнитная сила

ГЛАВА ПЯТАЯ

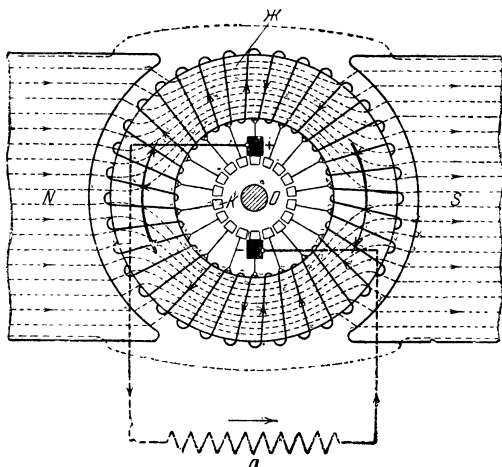
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ТОКА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

54. ДИНАМОМАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В § 38 (гл. 4) было уже указано, что необходимы надлежащие переключения проводов, пересекающих основной магнитный поток, для того чтобы индуктированный ток протекал по внешней части цепи непрерывно в одном и том же направлении. Подобное переключение, обычно называемое коммутацией¹, в динамомашинах постоянного тока осуществляется автоматически², т. е. само собой, по мере вращения той части динамомашин, которая несет на себе проводники, пересекающие магнитный поток. На фиг. 82 представлено в общих чертах устройство динамомашин постоянного тока. Эта машина состоит из трех основных частей.

Первая основная часть машины представляет собой магнит или чаще всего электромагнит с полюсами N и S , через промежуток между которыми проходит главный магнитный поток. В машинах постоянного тока эта часть обычно бывает неподвижна.

Второй весьма важной частью генератора является арматура³, или якорь, с проводниками, которые при вращении машины пересекают главный магнитный поток. В случае, представленном на фиг. 82, изображен кольцевой якорь или кольцо Грамма⁴. Такой якорь состоит из



Фиг. 82. Схема устройства динамомашин постоянного тока (с кольцом Грамма).

¹ Латинское слово «коммутацио» обозначает «изменение», «перемена».

² Греческое слово «αυτομάτος» значит «сам собой действующий», т. е. действующий без участия человека, на котором лежит только обязанность общего надзора.

³ Латинское слово «арматура» значит «вооружение», «снаряжение».

⁴ Грамм (1826—1901) — знаменитый французский изобретатель. В начале Грамм был столяром и работал на заводах. Затем начал заниматься вопросами электротехники (электрические машины и электрическое освещение).

железного кольца \mathcal{J} , на котором равномерно навита обмотка из изолированной медной проволоки. Концы этой проволоки спаяны между собой так, что получается непрерывная спиралеобразная обмотка. Кольцевой якорь закрепляется на оси O и при посредстве ее приводится во вращение от какого-либо механического двигателя. При вращении якоря части обмотки, лежащие на железном кольце с внешней стороны, будут пересекать магнитные линии, исходящие из полюса N и входящие в полюс S . На данном пути магнитные линии проходят через два воздушных зазора — между железным кольцом \mathcal{J} и поверхностями полюсов N и S , а также сквозь материал кольца, сгущаясь в нем, как показано на фиг. 82. При вращении кольца общее расположение магнитных линий остается неизменным, и все происходит так, как будто бегут только провода, навитые на кольцо. Таким образом создаются условия для того, чтобы в витках обмотки якоря, вращающейся между полюсами N и S , индуктировались э. д. с. Пользуясь правилом правой руки (см. § 37, гл. 4), нетрудно видеть, что в рассматриваемых условиях — при вращении armатуры в направлении часовой стрелки — в обеих половинах обмотки (левой и правой) индуктируются э. д. с., направленные по кольцу снизу вверх, т. е. навстречу одна другой. Благодаря этому общая э. д. с. левой половины кольца практически будет уравновешивать подобную же э. д. с. правой половины кольца, и вследствие равенства этих э. д. с. ток в замкнутой обмотке кольца не возникает. Однако, рассматриваемые две э. д. с. могут, действуя параллельно, возбудить ток в некоторой внешней цепи, например, в приемнике Π , если каким-либо способом постоянно поддерживать контакт этой внешней цепи с верхней и нижней частями кольцевой обмотки, именно с теми местами ее, где всегда осуществляется параллельное соединение этих двух равных и действующих одна навстречу другой индуктированных электродвижущих сил.

Для указанной цели и служит третья существенная часть динамомашины постоянного тока, именно так называемый коллектор¹, или коммутатор².

Коллектор K (фиг. 82) представляет собой барабан, изготовляемый чаще всего из твердой меди и составленный из достаточно большого числа продольных, хорошо изолированных одна от другой пластин. Коллектор прочно закрепляется на той же оси O , которая несет на себе и armатуру (якорь). Отдельные пластины коллектора электрически соеди-

¹ «Коллѣктор» дословно значит «собираетель» и происходит от латинского слова «коллѣкцио» — «собираение».

² Латинское слово «коммутаре» обозначает «переменять», «изменять». Вообще в области электротехники коммутатором называется всякое устройство, предназначенное для изменения направления тока.

няются с соответствующими точками кольцевой обмотки, подразделяемой для этой цели на секции¹, число которых в точности равно числу коллекторных пластин. К поверхности коллектора прижимаются две щетки, отмеченные на фиг. 82 знаками $+$ и $-$. Щетки коллектора обычно располагаются на противоположных его сторонах, приблизительно по линии, поперечной относительно линии полюсов, т. е. общего направления главного магнитного потока. Положительная ($+$) и отрицательная ($-$) коллекторные щетки закрепляются неподвижно в указанном положении и хорошо изолируются от других частей машины. Через посредство щеток и производится присоединение обмотки вращающегося якоря к внешней части электрической цепи (приемник L). При этом постоянный ток во внешней цепи складывается из двух составляющих, из двух, так сказать, его половин, каждая из которых генерируется в соответствующей половине обмотки якоря.

Если сосредоточить внимание на каком-либо определенном витке обмотки, то мы увидим, что за время одного полного оборота якоря по этому витку будет протекать ток то одного направления, то другого. Это непосредственно вытекает из того, что при вращении динамомашины в витках обмотки ее якоря могут индуцироваться, по существу, только переменные э. д. с. Лишь благодаря последовательным переключениям, осуществляемым при помощи коммутатора (коллектора), благодаря тому, что щетки последовательно соприкасаются с идущими одна за другой пластинами коллектора, мы достигаем так называемого выпрямления, т. е. возбуждаем во внешней цепи ток постоянного направления при помощи переменных э. д. с., своевременно переключаемых в моменты изменения их направления. При достаточно большом числе секций в armатуре и соответственно при достаточно большом числе коллекторных пластин ток во внешней цепи получается не только неизменно постоянного направления, но и практически постоянный по силе.

В кольцевой armатуре, как это ясно видно на фиг. 82, в пересечении магнитных линий главного потока участвуют только проволоки, расположенные на внешней поверхности железного кольца. Участки же проволоки, расположенные на внутренней поверхности кольца, обращенной к оси машины, почти совершенно не пересекают магнитных линий и в этом отношении оказываются бесполезными. В связи с этим в практике построения динамомашин постоянного тока получил большое распространение другой вид armатуры (якоря), именно так называемая барабанная armатура (барабанный якорь). В этом случае железный сердечник вра-

¹ Латинское слово «секция» обозначает «деление».

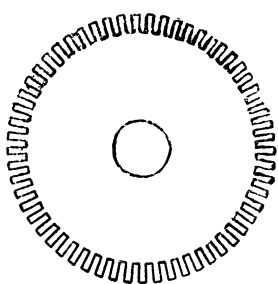
щающегося якоря имеет форму не кольца, а барабана, насаженного на ось вместе с коллектором, который остается неизменным. Проводники, предназначенные для пересечения магнитных линий, укладываются на поверхности барабана вдоль осевого направления. Указанные проводники соединяются между собой при помощи частей обмотки, располагаемых на торцевых сторонах железного барабана, и образуют ряд витков, окружающих барабан со всех сторон. Отдельные секции барабанной обмотки присоединяются к пластинам коллектора в общем подобно тому, как это делается в случае кольцевой обмотки (кольца Грамма). В барабанных обмотках проводники используются более экономно, чем в кольцевых, и в этом их главное преимущество. Кроме того барабанные обмотки при массовом производстве электрических машин более удобны по сравнению с кольцевыми обмотками, так как на поверхность железного барабана можно весьма легко накладывать отдельные витки и секции обмотки, в кольцевых же обмотках продевание наматываемой проволоки сквозь кольцо вызывает значительные затруднения. В основном генерирование постоянного тока при помощи барабанной обмотки ничем существенным не отличается от того, что было нами рассмотрено применительно к кольцевой обмотке (фиг. 82), и потому на сравнительно второстепенных подробностях устройства динамомашинок с барабанной обмоткой мы не будем останавливаться.

Так как железо якоря при его вращении во внешнем магнитном поле постоянно перемагничивается, то в нем могут возникать токи Фуко (см. § 52) и вызывать значительные бесполезные потери энергии. Во избежание этого все перемагничивающиеся части электромагнитных генераторов и, в частности, железные сердечники барабанных и кольцевых якорей изготовляют не сплошными, а составляют их из отдельных колец или дисков¹, которые вырезаются из железных листов (толщиной около половины миллиметра) и изолируются друг от друга при помощи, например, очень тонкой бумаги, приклеиваемой к железным листам специальным лаком.

Для улучшения способов механического закрепления проводов, укладываемых на железной основе якоря, а также для повышения качества машины, в настоящее время чаще всего применяют так называемые зубчатые обмотки (зубчатые якоря). При изготовлении зубчатых обмоток вырезаемые из железных листов заготовки (см., например, фиг. 83) снабжаются по окружности зубцами. Складывая эти заготовки в стопку так, чтобы зубцы приходились против зубцов, мы получим составной железный сердечник, на внешней по-

¹ Греческое слово «дискос» обозначает «круг».

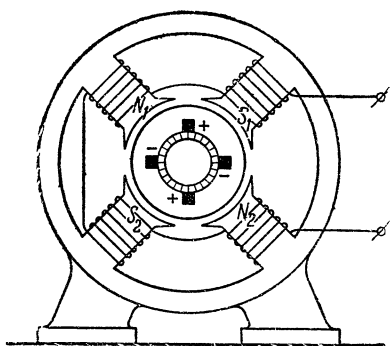
верхности которого образуются продольные впадины (или, как их иногда называют, пазы) в осевом направлении. В глубь этих пазов укладывают проводники и закрепляют их. Наличие зубцов, между которыми размещаются провода, позволяет значительно уменьшить величину воздушных зазоров между железным сердечником якоря и полюсными поверхностями. Это способствует уменьшению магнитного сопротивления (см. § 45, гл. 4) для главного магнитного потока и облегчает возбуждение этого потока.



Фиг. 83. Заготовка для зубчатой барабанной арматуры.

Щетки, применяемые для собирания тока с поверхности коллектора, изготавливаются из разнообразных проводящих материалов. Раньше коллекторные щетки делались из пучка медных проволочек или тонких пластинок, а также из надлежащим образом сложенной медной сетки. В последнее время чаще всего применяются угольные щетки, спрессованные из тонко измельченного кокса с примесью графита и иногда медного порошка (для улучшения проводимости). Во всяком случае, коллекторные щетки обычно делают из материала, возможно более мягкого, с той целью, чтобы уменьшить изнашивание поверхности коллектора, о которую щетки трутся при вращении машины.

При работе динамомашин постоянного тока в местах соприкосновения щеток с поверхностью коллектора обычно наблюдается некоторое искрообразование, которое может быть особенно сильным и вредным в отношении сохранности коллектора при полной нагрузке машины, т. е. когда машина дает наибольший допустимый для нее ток. Одной из главных причин искрообразования является то, что при вращении машины бывают моменты, когда щетка покрывает две соседние коллекторные пластины и, таким образом, временно коротко замыкает соответствующую секцию обмотки, своими концами приключенную к данным пластинам. Все эти явления, связанные с прохождением коллекторных пластин под щетками и обычно называемые явлениями коммутации, были предметом всестороннего изучения с целью нахождения наивыгоднейших условий построения коллекторных машин с возможно меньшим искрообразованием. Для уменьшения искрообразования под щетками оказывается полезным несколько смещать их. В динамомашинах, работающих в качестве генератора, щетки приходится смещать в направлении вращения.



Фиг. 84. Станина четырехполюсной динамомашины (с указанием расположения щеток).

Динамомашина, общая схема которой представлена на фиг. 82, имеет два магнитных полюса N и S . Это — так называемая двухполюсная машина (с одной парой полюсов). В некоторых случаях, в особенности при построении машин большой мощности, оказывается выгодным применять несколько пар полюсов, между которыми вращается арматура, иногда более сложного устройства, чем это имеет место при одной паре полюсов.

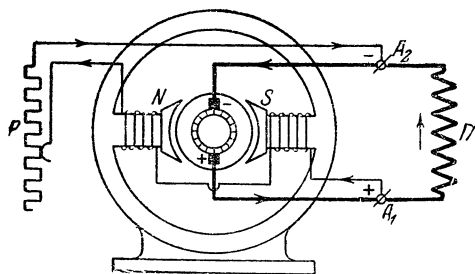
Такие многополюсные машины бывают с двумя парами полюсов (четыреполюсные), с тремя парами полюсов (шестиполюсные) и т. д. В виде примера на фиг. 84 изображена станина четырехполюсной машины. Эта кольцеобразная станина, изготовляемая из железа или из стали, поддерживает четыре сердечника с намагничивающей обмоткой, концы которых образуют чередующиеся полюсы N_1, S_1, N_2, S_2 . Соответственно четырем полюсам здесь указаны четыре щетки, прижимающиеся к коллектору — две положительные и две отрицательные, соединяемые попарно (эти соединения щеток не показаны на фиг. 84). Вообще говоря, число щеток в динамомашине равно числу полюсов, от которых зависит распределение главного магнитного потока, причем одноименные щетки соединяются между собой. Можно, однако, путем надлежащего соединения отдельных секций якорной обмотки уменьшить количество щеток, необходимых для собирания тока с коллектора, но это количество никогда не бывает меньше двух.

Как мы указывали выше, в динамомашинах постоянного тока главный магнитный поток обычно создается с помощью электромагнита. По обмотке этого электромагнита, который в многополюсных машинах имеет сложную форму, пропускается постоянный ток от какого-либо источника, чем достигается возбуждение машины. По способу возбуждения электрические машины разделяются на четыре группы: 1) машины с независимым возбуждением; 2) машины с параллельным возбуждением; 3) машины с последовательным возбуждением; 4) машины со смешанным возбуждением.

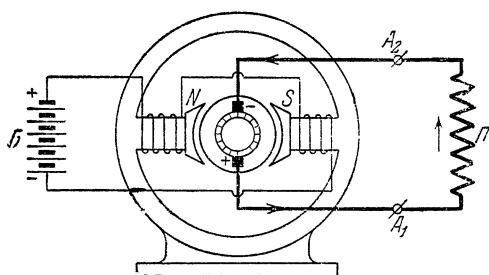
В машинах с независимым возбуждением обмотка электромагнита питается постоянным током от какого-либо совершенно постороннего источника, например от аккумуляторной батареи (фиг. 85). В этом случае цепь возбуждения, питаю-

щаяся от батареи B , и главная цепь машины, к зажимам которой A_1 и A_2 присоединен приемник Π , не имеют между собой никакой электрической связи, т. е. они вполне независимы одна от другой.

Совершенно очевидно, что вместо постороннего источника для возбуждения рассматриваемой динамомашины можно воспользоваться током, генерируемым этой самой машиной. Таким путем осуществляется самовозбуждение машины. В электротехнической практике применяются различные схемы присоединения обмотки электромагнитов к главной цепи машины, ток в которой поддерживается э. д. с., индуцируемой в арматуре. Как было уже выше указано, такое присоединение может быть параллельное, последовательное и смешанное. Во всех этих случаях при пуске динамомашин в ход, т. е. в самом начале после приведения ее во вращение, в обмотке ее якоря индуцируется обычно лишь очень ничтожная по величине э. д. с., возникающая в результате некоторого остаточного намагничивания сердечников электромагнита. Как ни ничтожна начальная э. д. с., она все же возбуждает слабый ток в обмотках электромагнита, что влечет за собой усиление магнитного поля, в котором вращается якорь. Благодаря этому увеличивается индуцируемая в якоре э. д. с. и снова усиливается ток в обмотках электромагнита и т. д., пока машина не возбудится нормально¹, т. е.



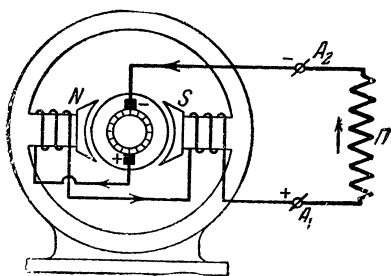
Фиг. 86. Схема параллельного (шунтового) возбуждения динамомашин.



Фиг. 85. Схема независимого возбуждения динамомашин.

пока главный магнитный поток не достигнет некоторой наибольшей для данных условий величины. С этого момента начинается установившийся режим работы динамомашин, и генерируемая ею э. д. с. приобретает то значение, на которое данная машина рассчитана.

¹ Латинское слово «норма» обозначает «правило», «образец». Латинское же слово «нормалис» значит «правильный», «соответствующий норме».



Фиг. 87. Схема последовательного (серийного) возбуждения динамомашины.

Так осуществляется самовозбуждение динамомашины постоянного тока.

В машинах с параллельным возбуждением обмотка электромагнита, состоящая из большого числа витков сравнительно тонкой проволоки, присоединяется к главным зажимам A_1 и A_2 (от щеток) параллельно приключенному к этим же зажимам приемнику Π (фиг. 86), т. е. обмотка электромагнита об-

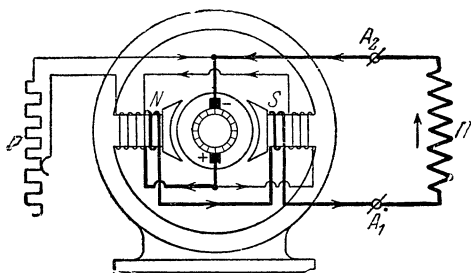
разует самостоятельную ветвь от главных зажимов машины. Поэтому машины с таким возбуждением весьма часто называются *шунтовыми*. Так как э. д. с., индуцируемая в armатуре, непосредственно зависит от величины главного магнитного потока, т. е. от силы возбуждающего тока, проходящего через обмотку электромагнита, то оказывается возможным в известных пределах изменять эту электродвижущую силу путем соответственного изменения тока возбуждения. С этой целью в ветвь, питающую электромагнит, кроме его обмоток, вводят еще реостат P , сопротивление которого можно изменять при помощи подвижного контакта. Подобного рода управление величиной э. д. с., индуцируемой в armатуре, называется *регулированием*¹ динамомашины.

В машине с последовательным возбуждением (фиг. 87) ток, идущий от одной из щеток, направляется сначала в обмотку электромагнита, состоящую из небольшого числа витков сравнительно толстой проволоки, а затем к внешнему зажиму A_1 . Вторая щетка непосредственно присоединяется ко второму внешнему зажиму A_2 . Такое возбуждение динамомашины часто называется *серийным*². Этим подчеркивается, что в данном случае обмотка якоря, обмотка электромагнита и приемник Π соединяются в один ряд (последовательно). Для того чтобы серийная машина возбудилась, необходимо замкнуть внешнюю цепь через какой-либо приемник. До замыкания цепи главный магнитный поток не может возрасти до надлежащей величины. В данном отношении серийная машина резко отличается от машины с независимым возбуждением и от шунтовой машины, для возбуждения которых нет необходимости в замыкании внешней цепи.

¹ Происхождение слова «регулирование» связано с латинскими словами: «регуля» — «правило», «рего» — «управляю».

² Латинское слово «сериес» обозначает «ряд».

Наконец, в машинах со смешанным возбуждением (фиг. 88) обмотка электромагнита делается из двух отдельных частей: из шунтовой, присоединяемой к щеткам параллельно главной внешней цепи, питающей приемник Π через зажимы A_1 и A_2 , и из серийной обмотки,

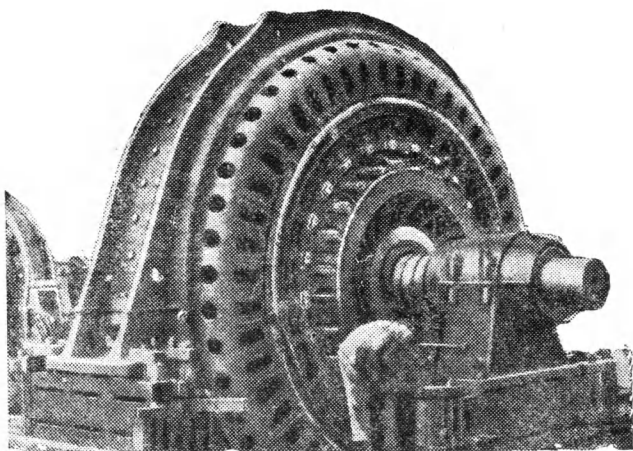


Фиг. 88. Схема смешанного (компаундного) возбуждения динамомашин.

включаемой последовательно с обмоткой арматуры до зажимов A_1 и A_2 . Подобное смешанное возбуждение иногда называют возбуждением компаунд¹. Применяется этот способ возбуждения динамомашин с той целью, чтобы сделать более устойчивым (неизменным) напряжение между главными зажимами A_1 и A_2 , к которым присоединяется внешняя цепь с приемниками. Дело в том, что даже в машине с независимым, строго постоянным возбуждением (фиг. 85) электродвижущая сила, генерируемая в обмотке арматуры, более или менее уменьшается по мере увеличения нагрузки, т. е. по мере увеличения силы тока, потребляемого приемниками. Это происходит главным образом вследствие так называемой реакции² якоря, которая обычно выражается в ослаблении главного магнитного потока под влиянием добавочного магнитного поля, связанного с током, протекающим по обмотке якоря. Для уменьшения реакции якоря в коллекторных машинах нередко применяют небольшие добавочные полюсы, которые располагаются совершенно так же, как и серийная обмотка главных полюсов, т. е. полным током якоря. Магнитное поле добавочных полюсов направляют против того поля, которое возникает благодаря току в якоре. С другой стороны, хотя сопротивление обмотки якоря и стремятся сделать возможно меньшим, все же протекание по ней тока нагрузки вызывает некоторое падение напряжения за счет расходования известной части основной э. д. с., генерируемой в якоре. Это внутреннее падение напряжения необходимо вычесть из основной э. д. с. для того, чтобы получить напряжение между главными зажимами A_1 и A_2 . Для противодействия понижению напряжения между

¹ Английское слово «компаунд» значит «составной», «сложный».

² Латинское слово «реакция» в данном случае обозначает «обратное действие», вызывающее ослабление какого-либо основного «действия» («акции»).



Фиг. 89. Общий вид динамомашины постоянного тока большой мощности.

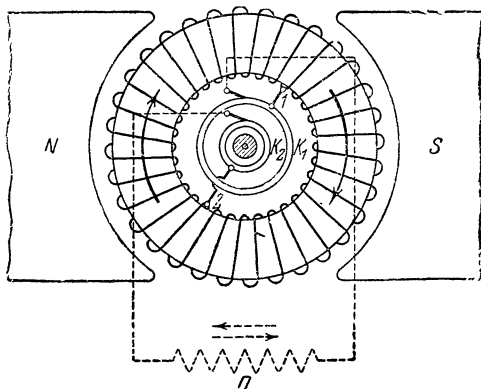
зажимами A_1 и A_2 от разных причин и служит добавочная серийная обмотка (фиг. 88), накладываемая на сердечники электромагнита рядом с шунтовой обмоткой, и при этом так, чтобы ток нагрузки увеличивал ампер-витки (см. § 45), возбуждающие главный магнитный поток. Надлежащим подбором числа витков серийной и шунтовой обмоток можно достигнуть того, что напряжение между внешними зажимами A_1 и A_2 поддерживается в достаточной степени постоянным, независимо от силы тока, потребляемого приемниками. Для первоначального установления необходимого напряжения между зажимами A_1 и A_2 в шунтовую обмотку машины с возбуждением компаунд (фиг. 88) обычно включают и регулировочный реостат P (шунтовой реостат).

Из всего предыдущего с полной очевидностью вытекает, что генерируемая динамомашиной э. д. с. непосредственно зависит от величины главного магнитного потока, от числа витков в обмотке якоря и от скорости вращения машины. Применением надлежащих устройств, обычно называемых регуляторами, практически более или менее обеспечивается постоянство скорости вращения первичных механических двигателей, с валом которых соединяют вал динамомашины. Соответствующими расчетами подбирают общие размеры динамомашины, а также величину главного магнитного потока и обмотку якоря так, чтобы эта динамомашина могла развивать необходимую мощность при требуемой э. д. с. В настоящее время подобные расчеты доведены до высокой степени совершенства и позволяют строить динамомашины

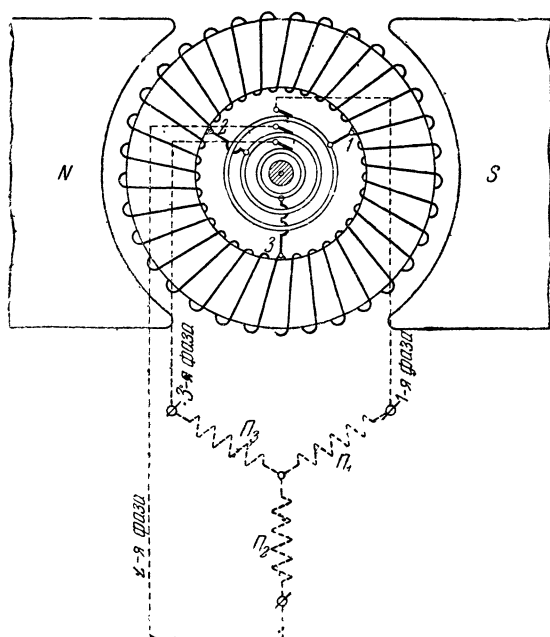
самых разнообразных размеров. Современная электромашиностроительная промышленность изготавливает динамомашин постоянного тока мощностью от долей киловатта до нескольких тысяч киловатт. При этом динамомашин малой мощности строятся на сравнительно большие скорости вращения — приблизительно от 1 000 до 2 000 оборотов в минуту. По мере повышения размеров и мощности машин скорость их вращения обычно делают все меньше и меньше, доходя в больших машинах примерно до 100 оборотов в минуту. На фиг. 89 представлен общий вид динамомашин постоянного тока большой мощности.

55. ОДНОФАЗНЫЕ И ТРЕХФАЗНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В предыдущем параграфе было уже указано, что в витках обмотки машин постоянного тока индуктируются э. д. с. переменного направления, и только благодаря выпрямительному действию коммутатора (коллектора) удается получать ток постоянного направления во внешней цепи, присоединенной к коллекторным щеткам. Если вместо коллектора снабдить некоторую обмотку двумя простыми контактными кольцами K_1 и K_2 (фиг. 90), которые соединены с двумя противоположными точками (1 и 2) ее обмотки, то при вращении машины через внешнюю цепь, содержащую приемник P , от контактных щеток потечет переменный ток. При этом полный период такого тока будет в двухполюсной машине равен времени одного полного оборота якоря. Мы получаем таким образом генератор однофазного тока, т. е. однофазный генератор. В данном случае электрическая цепь, замыкающаяся через посредство контактных колец и щеток, должна быть рассматриваема как цепь, неизменно замкнутая без каких бы то ни было переключений. Контактные кольца и щетки служат только для того, чтобы соединять между собой подвижную и неподвижные части одной и той же цепи. Контактные кольца обычно делают одного размера и рас-



Фиг. 90. Простейшая схема генератора однофазного тока.



Фиг. 91. Простейшая схема генератора трехфазного тока.

полагают их рядом на особом барабане из изолирующего материала, насаженном на ось генератора переменного тока. На фиг. 90 контактные кольца показаны разных размеров ради большей ясности схемы соединений.

Если три равноотстоящие точки 1, 2 и 3 обмотки якоря приключить к трем контактными кольцам, подобным выше-описанным двум, и при помощи соответствующих трех щеток присоединить далее к трем приемникам Π_1 , Π_2 и Π_3 (фиг. 91), соединенным, например, звездой, то через эти приемники будут проходить отдельные составляющие трехфазного тока. Три секции обмотки получающегося таким образом трехфазного генератора соединены в рассматриваемом случае треугольником, т. е. генератор соединен с приемниками трехфазного тока по схеме треугольник—звезда.

Совершенно подобным же образом можно построить однофазный или трехфазный генераторы, используя для этой цели не кольцевую обмотку (фиг. 90 и 91), а барабанную, в основном сходную с обмоткой, применяемой в динамомашинах постоянного тока.

Что касается возбуждения одно- и трехфазных генераторов, т. е. питания электромагнитов, создающих главный маг-

нитный поток, то в настоящее время обычно применяется схема независимого возбуждения (фиг. 85) от какого-либо источника постоянного тока. Для этой цели, в особенности при небольшой мощности генераторов переменного тока, принято пользоваться совершенно посторонним источником постоянного тока (батареями или динамомашинной). В случаях же большой мощности кроме отдельно установленных динамо-машин иногда применяется возбуждательная шунтовая динамо-машина, насаженная непосредственно на вал одно- или трех-фазного генератора. В цепь возбуждения электромагнитов генератора всегда, конечно, при этом включается соответствующий регулировочный реостат.

Описанные двухполюсные генераторы переменного тока (фиг. 90 и 91) практически не очень удобны, так как для получения частоты в 50 герцев, т. е. в 50 периодов в секунду, приходится сообщать им слишком большую скорость вращения, равную 50 оборотам в секунду, т. е. $50 \times 60 = 3\,000$ оборотам в минуту. С целью уменьшения необходимой скорости вращения оказывается выгодным строить многополюсные генераторы переменного тока, так как один полный период, по существу, соответствует времени прохождения какой-либо части генераторной обмотки мимо двух последовательно расположенных разноименных полюсов (N и S). Следовательно, в четырехполюсной машине, т. е. при двух парах полюсов, за время одного оборота мы будем иметь два полных периода индуцируемого переменного тока в шестиполюсной же машине — три полных периода и т. д. Вообще, времени одного оборота многополюсного генератора переменного тока соответствует число полных периодов, равное числу пар полюсов. Таким образом по мере увеличения числа пар полюсов в такой же степени уменьшается скорость вращения генератора, дающего переменный ток некоторой определенной частоты, например, равной 50 герцам. Для этой частоты в 50 герцев можем на основании сказанного составить такую таблицу:

Число полюсов генератора	2	4	6	8	10	12	
Скорость вращения (число оборотов в минуту) . . .	3 000	1 500	1 000	750	600	500	и т. д.

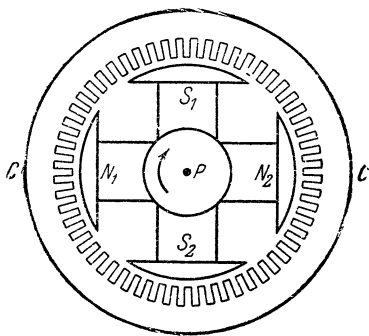
Говоря о машинах переменного тока, принято неподвижную часть называть *статором*¹, а вращающуюся часть — *ротором*². Таким образом мы можем сказать, что в описанных до сих пор генераторах одно- и трехфазного тока

¹ Слово «статор» происходит от латинского слова «статус» — «стояние».

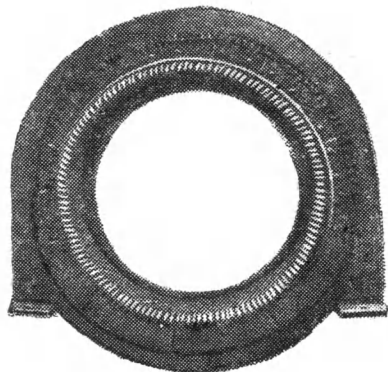
² Слово «ротор» происходит от латинского слова «ротаре» — «вращать».

(фиг. 90 и 91) на статоре расположены электромагниты, создающие главный магнитный поток, а ротор представляет собой часть, несущую генераторные обмотки того или иного рода.

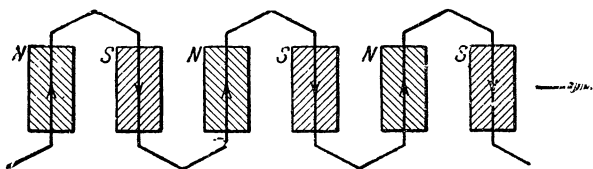
В случаях, когда мощность машины превосходит 10—20 киловаттов, оказывается более выгодным применить иное расположение ее основных частей. Именно электромагниты размещают на роторе, питая их от источника постоянного тока через посредство двух контактных колец и двух неподвижных щеток, а генераторные обмотки, в которых индуктируются основные э. д. с., располагают на статоре со стороны, обращенной к ротору. При этом та часть статора, которая подвергается непрерывному перемагничиванию, во избежание потерь на токи Фуко, составляется, конечно, из отдельных кусков листового железа. Кроме того, для удобства в размещении и креплении проводов генераторной обмотки статор изготавливается со впадинами (пазами), отделяющимися одна от другой зубцами подобно тому, как это обычно применяется в якорях динамомашии постоянного тока (фиг. 83). Подобное расположение главных частей четырехполюсного, например, генератора переменного тока показано на фиг. 92. Здесь P есть ротор с четырьмя сердечниками электромагнитов, к полюсам которых N_1 , S_1 , N_2 и S_2 прикрепляются железные наконечники (полюсные башмаки), надлежащим образом обточенные так, чтобы между наружной поверхностью этих башмаков и концами зубцов статора CC везде был одинаковый промежуток (зазор) возможно меньшей величины, практически измеряемой немногими миллиметрами. На фиг. 92 обмотки ротора и статора не показаны. Отдель-



Фиг. 92. Железные части четырехполюсного генератора переменного тока.



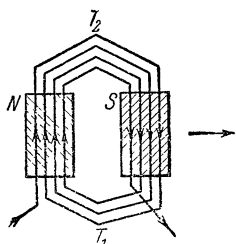
Фиг. 93. Статор трехфазного генератора.



Фиг. 94. Простейшая схема обмотки однофазного генератора.

ные проводники обмотки статора укладываются во впадинах между зубцами и объединяются в одну общую цепь, или секцию обмотки, при помощи так называемых торцевых или лобовых соединений, выдающихся наружу по обеим сторонам статора. На фиг. 93 показан отдельно статор многополюсного трехфазного генератора в совершенно собранном виде, с уложенными в пазы обмотками и с отчетливо выделяющимися торцевыми соединениями.

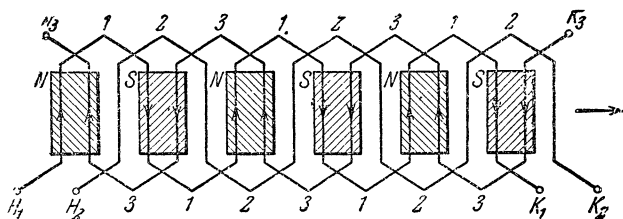
Что касается схемы обмотки статора, то ее очень удобно изображать в виде так называемой развертки, т. е. как будто бы некоторая часть этой обмотки, в действительности расположенная по внутренней цилиндрической поверхности статора, так сказать, развернута в плоскости чертежа. На фиг. 94 подобным образом представлена простейшая схема обмотки однофазного генератора. Каждая вертикальная часть ломаной линии представляет собой проводник, уложенный во впадине. Заштрихованные площадки изображают полюсы N и S , перед которыми расположены провода обмотки. Если представить себе, что эти полюсы движутся слева направо, то в проводниках, пересекающих магнитные линии, будут индуцироваться электродвижущие силы, направление которых показано на фиг. 94 стрелками для момента времени, соответствующего данному взаимному расположению неподвижной обмотки и движущихся полюсов (см. правило правой руки, § 37; необходимо только помнить, что при движении полюсов слева направо все происходит так, как будто бы «движение» проводников относительно неподвижных полюсов совершается в обратном направлении, т. е. справа налево). Через полпериода, когда на местах, занимаемых в данный момент времени полюсами N , окажутся полюсы S , и наоборот, в обмотке будут индуцироваться электродвижущие силы, по своему направлению прямо противоположные тому, что показано на фиг. 94. Еще через полпериода снова повторяются направления электродвижущих сил, представленные на этой фигуре и т. д. Обычно на полюс приходится большое число впадин. Это облегчает размещение обмотки, так как из-за ограниченности размеров каждой отдельной



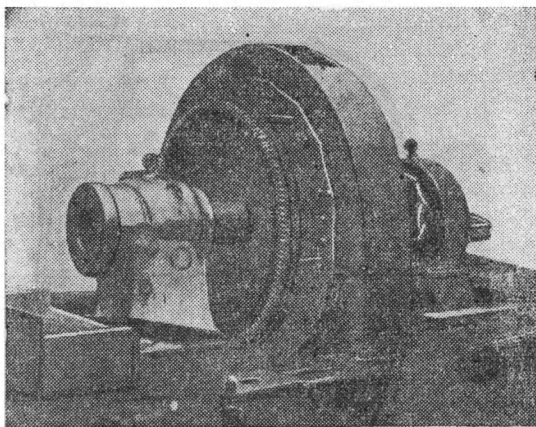
Фиг. 95. Схема части обмотки генератора переменного тока (четыре витка).

впадины не удастся расположить в ней все проводники, необходимые для получения данной электродвижущей силы. В связи с этим, обмотка может, например, принять вид, представленный на фиг. 95, где изображена только одна пара полюсов. Простая петля основной схемы (фиг. 94) превратилась здесь в катушку из четырех витков, в которых складываются отдельные электродвижущие силы, индуцируемые в проводниках, пересекающих магнитные линии. T_1 и T_2 — торцевые или любые другие соединения, выступающие наружу по обе стороны зубчатой основы статора. Есть несколько способов размещения во впадинах между зубцами необходимого количества проводов. Схему, показанную на фиг. 94, следует рассматривать только как упрощенное изображение обмотки статора однофазного генератора. В случае трехфазного генератора на статоре должны быть размещены подобные же три секции полной обмотки. Это в самом общем виде и представлено на фиг. 96 для случая шестиполюсного трехфазного генератора. Три самостоятельные секции трехфазной обмотки отмечены здесь цифрами 1, 2, 3. H_1 , H_2 и H_3 — начала обмоток 1-й, 2-й и 3-й фаз, а K_1 , K_2 и K_3 — их концы. Эти три секции могут быть соединены между собой звездой или треугольником. На рисунке ясно видно, что фазные обмотки сдвинуты одна относительно другой на одну треть расстояния между серединами двух одноименных полюсов. Стрелками показаны направления э. д. с. для данного момента времени.

Расположение генераторной обмотки на статоре очень выгодно между прочим в том отношении, что при этом оказывается возможным приключать внешнюю цепь непосредственно к неподвижной обмотке, избегая промежуточных трущихся контактных частей. Таким образом облегчается постройка



Фиг. 96. Простейшая схема обмотки генератора трехфазного тока,



Фиг. 97. Общий вид трехфазного генератора средней мощности (с горизонтальным валом).

машин на очень большие силы тока и большие напряжения. В то же время питание постоянным током вращающихся электромагнитов, размещенных на роторе, через контактные кольца и щетки не представляет особых затруднений даже в случае генераторов весьма значительной мощности, так как для возбуждения их расходуется лишь несколько процентов полной мощности, на которую рассчитана машина.

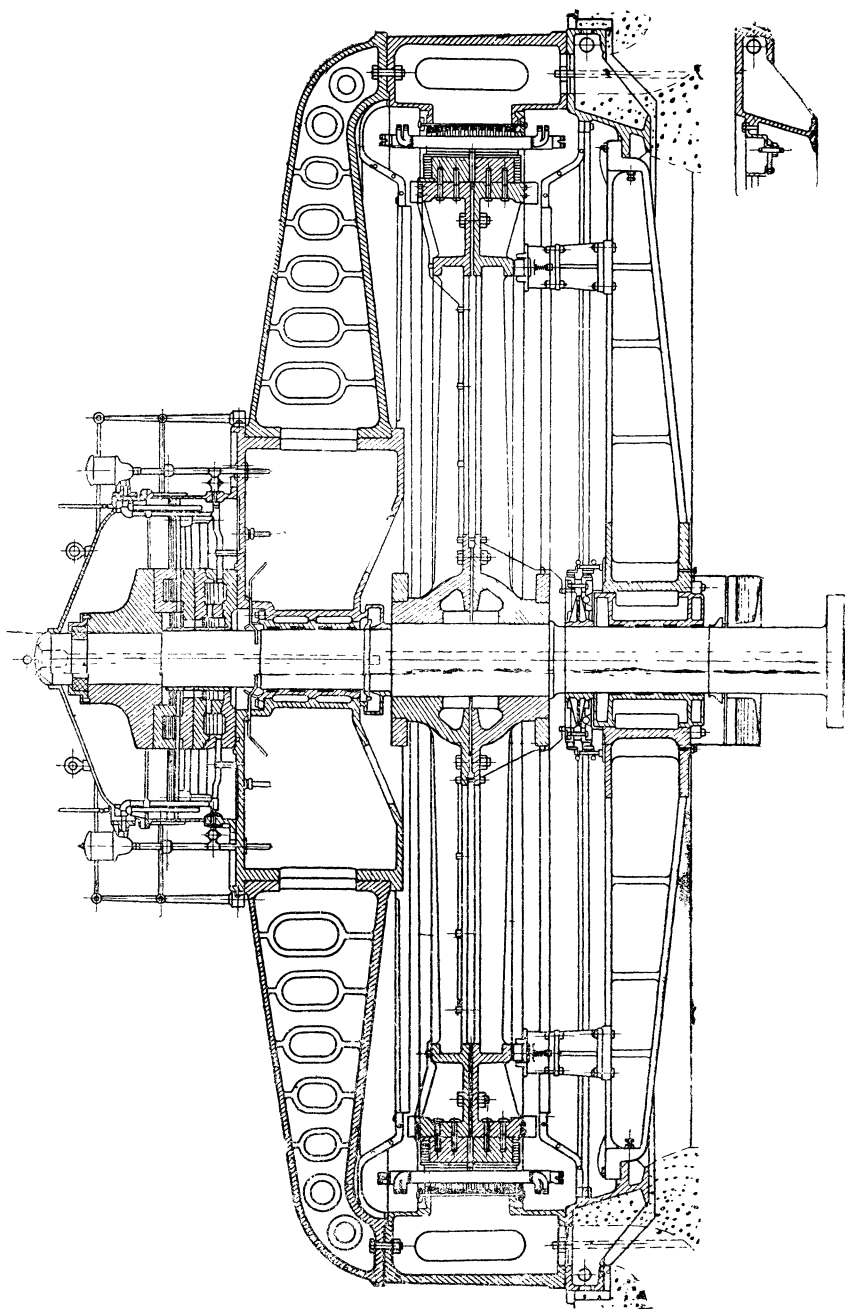
Генераторы переменного тока обычно строятся на напряжения порядка 3, 6, 10 и в некоторых случаях 35 киловольтов, т. е. тысяч вольт. Современная техника электромашиностроения позволяет выполнять эти генераторы на очень большие мощности, достигающие нескольких десятков тысяч киловаттов, а в отдельных случаях даже превышающие 100 000 киловаттов.

На фиг. 97 и 98 в виде примера изображены многополюсные трехфазные генераторы, с горизонтальным валом и с вертикальным валом.

56. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Для приведения во вращение электромагнитных генераторов тока применяются первичные двигатели разного рода: тепловые (паровые и внутреннего сгорания), гидравлические и в некоторых, пока немногочисленных, случаях — ветровые.

Сооружение, заключающее в себе первичные двигатели, электрические генераторы и другие вспомогательные устройства, называется электрической станцией и, в частности, центральной электрической стан-



Фиг. 98. Разрез трехфазного генератора большой мощности (с вертикальным валом), предназначенного для гидроэлектрической станции.

цией, когда это сооружение предназначено для снабжения энергией целого района с разнообразными потребителями. Электрические станции иногда называются генераторными станциями. Наконец, в зависимости от назначения, электрические станции называются еще районными или местными.

В зависимости от рода тока станции делятся на:

- 1) станции переменного тока (обычно — трехфазного);
- 2) станции постоянного тока.

В связи с рядом преимуществ переменного тока в отношении передачи и в особенности в отношении распределения электрической энергии (см. гл. 6), за последнее время среди новых установок станции постоянного тока почти не встречаются.

В зависимости от характера первичных двигателей электрические станции вообще могут быть:

- 1) теплоэлектрические (паровые, газовые и дизельные¹⁾);
- 2) гидроэлектрические;
- 3) ветроэлектрические.

В современных условиях теплоэлектрические станции, рассчитанные на генерирование токов большой мощности, обычно бывают паровыми. В качестве первичных двигателей на больших центральных станциях теперь применяются почти исключительно паровые турбины, позволяющие более экономично использовать тепловую энергию, развиваемую при сжигании горючего в топках паровых котлов, чем в поршневых паровых машинах, т. е. в таких машинах, в которых водяной пар совершает работу, перемещая своим давлением поршни в цилиндрах. Кроме того паровые турбины представляют значительное преимущество еще в том отношении, что при сравнительной простоте устройства они могут быть изготовляемы на чрезвычайно большую мощность, развиваемую каждой отдельной турбиной. В настоящее время их строят на мощности, превышающие 100 000 киловаттов. Как известно, в паровых турбинах вращательное движение вала машины достигается непосредственно путем воздействия струй пара на лопатки, имеющие надлежащую форму и в большом количестве укрепленные на валу. Поршневые паровые машины применяются лишь на небольших электрических станциях.

В некоторых случаях паровые электрические станции устраиваются с таким расчетом, чтобы отработавший в турбинах горячий пар мог быть в дальнейшем использован для

¹ Дизель (1858—1913) — немецкий инженер, много работавший над созданием нового типа двигателя внутреннего сгорания, потребляющего в качестве топлива сырую нефть. По имени изобретателя этот двигатель и называется «дизелем».

целей отопления зданий или для нагревания в каких-либо производствах. Такого рода станции называются **теплогоснабжающими электростанциями**.

Обычно стремятся к тому, чтобы скорость вращения вала паровой машины (турбины или поршневой машины) в точности была равна скорости вращения электрического генератора, приводимого в движение от этой паровой машины. В этом случае вал электрического генератора просто соединяется с валом паровой машины, так что один является продолжением другого. При подобном соединении паровой турбины с электрическим генератором получается как бы одна сложная машина, которая называется **турбогенератором**. Если скорости вращения паровой машины и электрического генератора неодинаковы, приходится соединять эти машины при помощи ременной или зубчатой передачи. Однако, в настоящее время всячески избегают этого.

В качестве топлива, потребляемого паровыми электрическими станциями и являющегося основным источником энергии, которая в дальнейшем — при посредстве паровых котлов, паровых машин и электромагнитных генераторов — преобразуется в энергию электрического тока, в современных условиях на первое место следует поставить каменный уголь. Далее, у нас в СССР сильно развито потребление торфа, добыча которого обеспечивает топливом ряд крупных электрических станций. Затем, некоторые центральные станции работают пока еще на нефти, но в дальнейшем надо ждать сокращения потребления этого в высокой степени ценного горючего, так как оно более необходимо в нашем народном хозяйстве как исходный продукт для дальнейшей переработки и для развития нашей химической промышленности. Наконец, у нас начинает развиваться использование природных горючих газов, которые по простым трубопроводам и весьма экономично могут подаваться от мест выходов газа в котельные отделения электрических станций. Во всех случаях стремятся располагать паровые станции как можно ближе к местам добычи горючего, чтобы избежать расходов по перевозке его к месту потребления, так как существует более выгодный способ передачи энергии, именно электрическая передача ее.

Жидкое и газообразное топливо может потребляться на электрических станциях и непосредственно без промежуточного образования пара в котлах. Для этого служат упоминавшиеся выше двигатели внутреннего сгорания. Такого рода машины-двигатели, работающие на жидком топливе — нефти, обычно строятся по системе инженера Дизеля и называются **дизелями**. Газовые двигатели внутреннего сгорания могут потреблять природные горючие газы, а также коксовые и доменные газы, что особенно важно для металлургических

заводов. Хотя в двигателях внутреннего сгорания топливо используется более совершенно, чем в паровых машинах, однако, эти двигатели до настоящего времени не получили при сооружении тепловых электрических станций столь большого распространения, как паровые машины (турбины). Главная причина этого заключается в значительных затруднениях, встречающихся при построении двигателей внутреннего сгорания более или менее значительной мощности, достаточной для приведения в движение современных весьма крупных электрических генераторов. Ставить же на больших станциях много мелких генераторов невыгодно. Поэтому двигатели внутреннего сгорания пригодны лишь для электрических станций местного значения, рассчитанных на сравнительно небольшую мощность.

В дополнение к установленным на электрической станции первичным двигателям и электромагнитным генераторам играет существенную роль так называемое распределительное устройство. Дело в том, что обычно на центральной электрической станции более или менее значительной мощности устанавливается не один, а несколько генераторов, которые должны одновременно, т. е. параллельно, работать на общую внешнюю цепь. Поэтому на больших станциях выделяется некоторое определенное помещение, где располагаются главные общие провода, называемые распределительными шинами¹, к которым подводятся провода от всех установленных генераторов и от которых идут провода, непосредственно или через повысительные трансформаторы, питающие отходящую от станции линию передачи или вообще внешнюю цепь. К распределительному устройству относятся также всякого рода выключатели и переключатели, служащие для выполнения необходимых соединений. В случаях больших мощностей, подлежащих отключению, и в условиях повышенных и высоких напряжений обычно применяются масляные выключатели, т. е. такие, основные части которых помещаются в особом баке, заполненном хорошо изолирующим нефтяным маслом, наличие которого способствует скорейшему гашению вольтовых дуг, возникающих между металлическими частями в момент их раздвижения. Для приведения в действие подобного рода масляных выключателей, иногда очень значительных по своим размерам, применяются специальные электромагнитные механизмы, которые приводятся в движение током, посылаемым в соответствующий момент из особого центрального наблюдательного

¹ Немецкое слово «шина», в переводе — «рельс», «полоса», вошло в употребление в русском электротехническом языке для обозначения общих проводов (иногда медных полос), применяемых в распределительных устройствах.

пункта. Этот пункт, обычно называемый распределительной доской, или распределительным щитом, содержит в себе все приборы управления электрической схемой станции. Здесь бывают сосредоточены все вольтметры, амперметры, ваттметры и электрические счетчики, служащие для наблюдения за работой генераторов. Здесь же устанавливаются и другие вспомогательные приборы, между прочим и так называемые быстродействующие релé¹, которые в случае каких-либо аварий² на станции или на линии передачи автоматически производят необходимые изменения в схеме соединений распределительного устройства и выполняют это значительно быстрее, чем могут сделать дежурные по станции. При помощи распределительного устройства, иногда довольно сложного и располагаемого в особом помещении, осуществляется и параллельное соединение генераторов станции, для чего возбуждение подключаемого генератора регулируется таким образом, чтобы развиваемая им э. д. с. соответствовала напряжению на главных шинах, питаемых уже работающими генераторами. Кроме того в генераторах переменного тока предварительно добиваются равенства частоты подключаемого и уже работающих генераторов, а также приводят в надлежащее соответствие фазы развиваемых ими электродвижущих сил. Приведение двух переменных э. д. с. к полному равенству их частот и фаз достигается изменением скорости вращения соответствующих генераторов, в которых индуктируются эти э. д. с. Такого рода регулирование машин переменного тока называется их синхронизацией³, а машины, э. д. с. которых уже приведены к одной и той же частоте, называются синхронизированными машинами. Вообще машины переменного тока, обладающие тем свойством, что их частота непосредственно зависит от

¹ Французское слово «релé» первоначально обозначало «смену» или «место смены» (почтовых лошадей, охотничьих собак и т. п.). В области электротехники слово «реле» вошло в употребление для обозначения автоматически действующего механизма, заменяющего ручное включение тех или иных контактов в какой-либо электрической цепи.

² Русское слово «авария» происходит от французского слова «аварй» что значит «повреждение», «поломка», «порча».

³ Слова «синхронизация», «синхронизированный», «синхронный» происходят от греческих корней. Греческое слово «хрónос» обозначает время, а добавочная частица «син» применяется для обозначения «одинаковости», «совпадения». В целом «синхронный» значит «совпадающий по времени», «идущий в такт». В частности, в синхронизированных машинах переменного тока некоторый проводник, произвольно выбранный в armатуре одной машины, подвергается такому же индуктивному воздействию со стороны магнитного поля и в тот же (или почти тот же) момент времени, как второй подобный проводник в armатуре другой машины.

скорости их вращения, принято называть синхронными машинами.

Само собой разумеется, что на распределительной доске или на распределительном щите сосредоточены и все приборы, служащие для управления возбуждением генераторов. Сюда относятся амперметры, измеряющие силу тока в цепях возбуждения, а также регулировочные реостаты. На станциях переменного тока все управление динамомашинами, предназначенными для питания возбуждения главных генераторов постоянным током, также производится от распределительной доски (щита).

Если напряжение, применяемое на отходящих от станции линиях передачи переменного тока, превышает напряжение на распределительных шинах, то в самой станции или непосредственно рядом с ней устанавливаются повысительные трансформаторы. Современные высоковольтные трансформаторы, в целях достижения надлежащей изоляции между отдельными частями их обмоток, обычно помещаются в специальные баки, заполненные так называемым трансформаторным маслом, добываемым из нефти. Каждый трансформатор имеет самостоятельный бак, плотно закрытый крышкой, которая снабжается особыми проходными изоляторами, служащими для вывода наружу концов обмоток.

Невиданный в истории других стран размах электростроительства в нашем Союзе естественно связан теснейшим образом с сооружением большого количества центральных электрических станций, среди которых по общей мощности на первом месте стоят пока паровые электрические станции. После Октябрьской революции сооружено несколько десятков подобных станций, на общую мощность свыше 8 000 000 киловаттов, причем в отдельных случаях мощность одной станции доходит до 200 000—250 000 киловаттов и более. Сооружение паровых станций непрерывно развивается.

В широко развернувшемся у нас после Октябрьской революции строительстве больших электрических станций использование гидроэнергии, т. е. водной энергии, получило весьма значительное развитие. Больших гидроэлектрических станций в царской России совершенно не было. По настоящее время в нашем Союзе уже построен целый ряд крупных гидростанций на общую мощность свыше 1 500 000 киловаттов, из которых одна Днепровская (сильно поврежденная фашистами во время Великой Отечественной войны и теперь восстанавливаемая) имеет установленную мощность в 560 000 киловаттов и принадлежит к числу крупнейших гидроэлектрических станций во всем мире. Запасы еще совершенно не использованной гидроэнергии в СССР чрезвычайно велики.

Намечено развитие очень больших строительных работ на Волге, Ангаре и в других наших водных бассейнах.

В основном гидроэлектрическая станция состоит из тех же главных частей, что и паровая станция, с той лишь разницей, что вместо паровой машины роль первичного двигателя играет гидравлическая турбина, приводимая во вращение струями воды, надлежащим образом направляемыми на лопатки турбины. Непосредственное отношение к станции имеют гидротехнические сооружения, служащие для создания необходимого напора воды, работающей в турбинах. В зависимости от общих местных условий эти сооружения приобретают тот или иной характер. В случае сравнительно многоводной и судоходной реки строят плотину, перегораживающую реку, и располагают гидроэлектрическую станцию у самой плотины, у одного из берегов. Вместе с тем рядом с плотинной сооружают шлюзы для пропуска судов. В других случаях, когда река немноговодна, но очень порожиста и имеет значительные перепады, подпорная плотина и гидроэлектрическая станция разделяются некоторым расстоянием. От места расположения плотины вода подается в напорный бассейн станции по специально сооружаемому, иногда очень длинному водотводному каналу, который проходит либо открыто по склону какой-нибудь возвышенности, либо в виде тоннеля сквозь горную породу. Канал делается с небольшим уклоном, и вода течет по нему сравнительно медленно. От напорного бассейна, который располагается в непосредственной близости к станции, на высоте, достигающей иногда сотен метров, вода направляется в турбины по стальным трубам. В связи с постройкой гидроэлектрических станций нередко сооружаются в выше расположенных местах искусственные водохранилища, предназначенные для того, чтобы накапливать воду в периоды большого притока водяных осадков и затем до известной степени равномерно расходовать ее на приведение в движение турбин станции. Это называется регулированием расхода воды.

Что касается использования ветровых двигателей для приведения в действие электрических генераторов, то по данному поводу необходимо сказать следующее. Уже давно делались попытки в этом направлении и строились небольшие ветроэлектрические станции с мощностью, не превосходящей десятков киловаттов.

Изучение вопроса о ветроэлектрических установках показывает, что существует ряд местностей, где благодаря природным условиям ветры достаточной силы дуют в течение значительной части года и могут быть использованы для электроэнергетического хозяйства. Однако ввиду отсутствия

полной определенности в отношении того, когда именно ветер достигнет необходимой силы, электрические станции, работающие на ветровых двигателях, должны быть так рассчитаны, чтобы, несмотря на эту неопределенность, генерируемая ими электрическая энергия все же могла быть использована. Для этой цели небольшие, отдельно стоящие ветроэлектрические станции обычно снабжаются генератором постоянного тока и соответствующей батареей аккумуляторов, заряжаемой в то время, когда станция работает, и обеспечивающей подачу электрической энергии к приемникам, когда это требуется. Но аккумуляторная батарея представляет собой сравнительно дорогую часть установки и требует внимательного ухода. Поэтому такого рода ветроэлектрические станции целесообразны только в исключительных случаях, когда вопросы стоимости электрической энергии отходят на второй план. Более экономно можно использовать энергию ветра, в особенности в случае сравнительно мощных ветроэлектрических установок, если применять на них генераторы трехфазного тока, соответственным образом подключаемые к общей внешней сети, параллельно с другими питающими эту сеть электрическими станциями (тепловыми или гидравлическими). Таким образом в период достаточно сильных ветров станции с ветровыми двигателями могут принимать на себя более или менее значительную часть нагрузки общей сети и этим давать экономию в расходе топлива или воды на других станциях, которые, с другой стороны, полностью обеспечивают питание приемников в периоды затишья ветра. В нашем Союзе подобные ветроэлектрические станции намечаются к постройке в ближайшие годы, причем мощность каждой из них на первое время предполагается доводить до нескольких сот киловаттов и в отдельных случаях — до нескольких тысяч киловаттов.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОДСТАНЦИИ

57. ОБЩАЯ СХЕМА СНАБЖЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИЕЙ ОТ ГЕНЕРАТОРНЫХ СТАНЦИЙ

В современном электроэнергетическом хозяйстве обычно используется более или менее сложный путь прохождения электрической энергии от вырабатывающих ее генераторов до потребляющих ее разнообразных приемников (осветительных устройств, электродвигателей, нагревательных приборов и т. д.). Что касается применяемых напряжений, то в огром

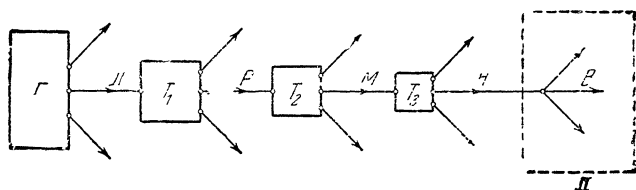
ном большинстве случаев приемники строятся на напряжение порядка 110 и 220 вольт. В некоторых случаях, в частности для питания электродвигателей в промышленных предприятиях, оказывается более выгодным применять повышенное напряжение (380 или иногда 500 вольт). Наконец, в особых случаях, например, для питания очень мощных электродвигателей вообще и в области электрической тяги на железных дорогах в частности, на зажимы приемников непосредственно подается напряжение, достигающее до 1 000 вольт и даже превышающее 1 000 вольт.

Как будет подробно разъяснено в следующем параграфе, при передаче электрической энергии на значительные расстояния оказывается весьма выгодным применять напряжения между проводами, во много раз превышающие то напряжение, на которое рассчитаны обычные приемники. Таким образом возникает вопрос о преобразовании тока одного напряжения в ток другого напряжения. Целесообразное решение этого вопроса позволяет передавать электрическую энергию токами высокого напряжения, а затем после надлежащих обратных преобразований, подводить ее к приемникам в виде токов соответствующего низкого напряжения между проводами. В случае постоянного тока подобного рода преобразования в настоящее время могут быть осуществлены лишь при помощи сравнительно дорогих устройств, еще недостаточно проверенных на практике. В то же время трансформаторы переменного тока (см. §§ 51 и 52) позволяют производить необходимые преобразования в общем достаточно экономично. Благодаря этому в современных условиях в случаях необходимости передавать электрическую энергию на более или менее значительные расстояния применяется почти исключительно переменный ток¹, так как при этом удешевляется устройство линии передачи энергии (см. § 53).

На фиг. 99 представлена в наиболее общем виде схема последовательного прохождения электрической энергии от основной генераторной станции трехфазного тока, т. е. схема так называемой к а н а л и з а ц и и² электрической энергии.

¹ Особенно большие заслуги в развитии практического применения трехфазного тока принадлежат нашему соотечественнику—А. М. Доливо-Добровольскому (1864—1936). Он первый показал выгоду передачи электрической энергии трехфазным током; он же разработал первые конструкции наиболее распространенных в настоящее время электродвигателей трехфазного тока.

² Провода, по которым электрическая энергия распространяется от генераторной станции к приемникам, являются своего рода «каналом» для движущейся энергии. Отсюда и происходит слово «канализация», по своему смыслу охватывающее все виды передачи и распределения электрической энергии.

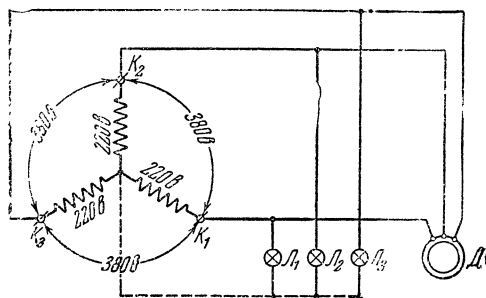


Фиг. 99. Общая схема снабжения приемников электрической энергией.

Ради упрощения схемы три провода трехфазного тока изображаются одной линией со стрелкой, соответствующей направлению движения электрической энергии. От повысительных трансформаторов генераторной станции G отходит одна или несколько линий электрической передачи L , протяжением до сотен километров. В настоящее время обычным напряжением для линий передач является 110 или 220 киловольт, т. е. тысяч вольт. Стремление передавать энергию на еще большие расстояния заставляет обращаться к применению напряжений, превышающих 220 киловольт. Каждая линия передачи L заканчивается на соответствующей понизительной подстанции T_1 , являющейся первой в ряду такого рода подстанций и потому называемой главной понизительной подстанцией. На этой подстанции устанавливаются трансформаторы переменного тока, при помощи которых высокое напряжение трехфазного тока, подводимого по линии передачи L (т. е. напряжение в 110 или 220 киловольт), понижается обычно до 35 киловольт. При этом сравнительно пониженном напряжении трехфазный ток поступает затем в провода районной распределительной сети, назначение которой заключается в том, чтобы надлежащим расположением проводов этой сети обеспечить подачу электрического тока к разбросанным по данному району местам потребления энергии. В таких местах потребления энергии располагаются вторичные понизительные подстанции T_2 , присоединенные к районной распределительной сети P и при помощи установленных на них трансформаторов преобразовывающие подаваемое напряжение в 35 киловольт в напряжение, приблизительно равное 3, 6 или 10 киловольтам. От вторичных подстанций T_2 питаются местные распределительные сети M (городские, фабрично-заводские, сельскохозяйственные и т. д.), работающие при напряжении от 3 до 10 киловольт и, в свою очередь, подводящие электрическую энергию к многочисленным транс-

форматорным пунктам T_3 . В этих пунктах, иногда называемых просто трансформаторными будками, происходит последнее преобразование электрической энергии с напряжения от 3 до 10 киловольтов на напряжение, непосредственно подаваемое на зажимы разного рода приемников, т. е. так называемое низкое напряжение (110, 220 и 380 вольт). Отходящие от трансформаторных будок T_3 цепи низкого напряжения H вводятся прямо в различные здания D (жилые дома, учреждения, мастерские), в которых находятся приемники, присоединенные к внутренней сети B .

Как было разъяснено выше, в § 53, для подачи трехфазного тока достаточно иметь три провода. Именно так и устраиваются линии трехфазной передачи L (фиг. 99), районные распределительные сети P и местные распределительные сети M . Что касается цепей низкого напряжения H и внутренних сетей B , то в них иногда применяется четвертый, так называемый нейтральный или нулевой провод. Это делается, например, тогда, когда оказывается необходимым напряжение в 380 вольт для питания более или менее крупных электродвигателей. Дело в том, что при соединении звездой вторичных обмоток понизительных трансформаторов (в будках T_3), в случае если э. д. с. в каждой из этих обмоток равна 220 вольтам, напряжение между каждой парой внешних зажимов звезды (фиг. 100) будет как раз равно 380 вольт. Следовательно, лампы или группы ламп накаливания L_1 , L_2 и L_3 , изготовляемые для напряжения в 220 вольт, могут питаться от отдельных фазных обмоток и для этого включаются между нулевым проводом 0 и каждым из внешних зажимов K_1 , K_2 и K_3 , а трехфазные электродвигатели D присоединяются непосредственно к этим зажимам K_1 , K_2 и K_3 . Если бы три группы ламп L_1 , L_2 и L_3 были совершенно тождественны, то присоединение провода 0



Фиг. 100. Питание приемников от трехфазной цепи по схеме с нулевым проводом.

к нейтральной точке соединенного звездой трехфазного трансформатора было бы совершенно излишним. Практически, однако, не всегда осуществляется указанное равенство осветительных нагрузок трех фаз, и потому для поддержания сравнительного постоянства напряжения, питающего каждую группу ламп,

применяют присоединение к нейтральной точке, причем оказывается достаточным меньшее сечение провода 0, чем сечение главных осветительных проводов, присоединенных к зажимам K_1 , K_2 и K_3 .

Общая схема передачи и распределения энергии, представленная на фиг. 99, охватывает только самые существенные стороны этой области электроэнергетического хозяйства. В действительных условиях иногда встречаются те или иные отступления от этой схемы. Мы; например, предполагали, что снабжение приемников электрической энергией производится от одной генераторной станции G . На практике нередко имеют место случаи, когда в целях обеспечения данного района достаточным количеством энергии приходится питать его от нескольких генераторных станций одновременно. При этой параллельной работе нескольких станций на одну и ту же сеть в зависимости от обстоятельств поступают различным образом. Если отдельные генераторные станции расположены довольно далеко одна от другой и от района потребления энергии, то от каждой из них идет самостоятельная высоковольтная линия передачи к главной понижительной подстанции T_1 . Таким образом параллельная работа нескольких генераторных станций осуществляется путем надлежащих соединений на главной понизительной подстанции. Иногда параллельно работающая на общую сеть генераторная станция подает трехфазный ток при напряжении порядка 35 киловольтов непосредственно на сравнительно близко расположенную главную понизительную подстанцию T_1 , питающую районную распределительную сеть P , или при напряжении от 3 до 10 киловольтов на вторичные понизительные подстанции T_2 , питающие местные распределительные сети M , или же генераторная станция может быть присоединена особо к местной распределительной сети, минуя вторичные понизительные подстанции T_2 . Наконец, в отдельных случаях, когда местная распределительная сеть M является достаточно значительной в отношении потребляемой мощности, линия передачи может подводить энергию непосредственно к трансформаторной подстанции T_2 , преобразующей высокое напряжение в напряжение порядка 6 или 10 киловольтов и питающей местную распределительную сеть.

Во всех случаях параллельной работы нескольких генераторных станций достигается одно чрезвычайно важное преимущество. Всякая авария на генераторной станции или на линии передачи может угрожать перерывом в снабжении энергией от данной станции, приостановкой ряда промышленных предприятий и т. п. Все это может наносить значительные убытки. Объединение нескольких генераторных станций, параллельно работающих на одну общую сеть, является

серьезной гарантией в этом отношении. В случае аварии на одной из таких станций или на идущей от нее линии передачи, эта станция или линия передачи при помощи соответствующих автоматических приспособлений и выключателей немедленно отделяется от общей сети. Таким образом нагрузка, до аварии лежавшая на отключенной станции, перераспределяется между другими станциями, исправно работающими, и данный район продолжает питаться электрической энергией без перерыва. Временная перегрузка остающихся в работе станций обычно не представляет ничего чрезмерно опасного. В таких случаях всегда принимаются надлежащие меры к скорейшему исправлению происшедших повреждений и к приведению всей системы электроснабжения в нормальное состояние.

Параллельная работа тепловых и гидроэлектрических станций оказывается весьма полезной и в тех случаях, когда особенности водного хозяйства не дают возможности достигнуть полного годового регулирования, т. е. обеспечения неизменного расхода воды в течение всего года. В периоды, когда гидроэлектрические станции работают на полную мощность, тепловые станции могут работать не с полной нагрузкой и экономить топливо, а в периоды малой воды, когда гидроэлектрические станции бывают вынуждены сократить число работающих на них генераторов, тепловые станции работают при полной нагрузке. Итак, объединение ряда генераторных станций в одной общей системе наилучшим образом обеспечивает надежность и бесперебойность электроснабжения, а также позволяет достигнуть наиболее благоприятных, с экономической точки зрения, результатов путем целесообразного совместного использования различных природных источников энергии.

В связи со всем только что сказанным, в СССР, а также во всех странах мира, ведется работа по созданию единой высоковольтной сети, охватывающей большие пространства и объединяющей много крупных генераторных станций. Социалистическая система хозяйства в СССР открывает для этого широкие возможности. В то же время в капиталистических странах это затрудняется частновладельческими интересами различных компаний и фирм. При создании единой высоковольтной сети возникает вопрос о применении напряжений более высоких, чем 220 киловольтов. Вместе с тем оказывается выгодным передавать электрическую энергию постоянным током очень высокого напряжения, доходящего в некоторых предположениях до одного миллиона вольт. При этом намечается нижеследующая общая схема. Обычные электрические станции генерируют трехфазный ток нормального напряжения порядка 10 киловольтов или несколько выше.

Трансформаторами это напряжение повышается до нескольких сот киловольтов. Затем при помощи специальных выпрямительных устройств трехфазный переменный ток преобразуется в постоянный ток соответственно высокого напряжения, который и поступает в линию передачи. В данном случае оказывается возможным ограничиться только одним проводом, подвешенным на соответствующих изоляторах. В качестве второго (обратного) провода может служить земля, для чего применяют так называемые заземления, состоящие из помещенных во влажную землю металлических электродов большой поверхности (листов или труб). Заземления присоединяются в начале и в конце линии передачи к тем точкам схемы, к которым должны были бы быть приключены концы второго провода линии передачи. Таким путем может быть достигнута значительная экономия при сооружении линии передачи. Далее на главных подстанциях, питаемых высоковольтным постоянным током, этот ток обратно преобразуется в трехфазный переменный ток сначала высокого напряжения, которое, наконец, понизительными трансформаторами доводится примерно до 35 киловольтов, поступает в обычные районные распределительные сети и т. д. Осуществлению подобного рода схемы энергоснабжения до сих пор еще препятствует отсутствие достаточно надежных и экономично работающих устройств, необходимых для преобразования трехфазного переменного тока высокого напряжения в постоянный ток, и обратно. Однако, современные достижения науки и техники позволяют надеяться, что указанные затруднения будут преодолены, и тогда кратко очерченная выше схема электрической передачи энергии постоянным током очень высокого напряжения может получить широкое распространение взамен господствующей теперь системы трехфазного тока.

58. ЛИНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ

Мы уже указывали раньше, что при передаче электрической энергии на значительные расстояния оказывается весьма целесообразным применение высоких напряжений между проводами. Можно сказать без всяких преувеличений, что только благодаря высоким напряжениям становится осуществимой передача энергии на большие расстояния в условиях достаточной экономичности, т. е. при сравнительно небольших потерях энергии и соответственно при большой отдаче, или, как говорят, при большом коэффициенте полезного действия.

Роль высокого напряжения при передаче энергии заключается в следующем. Проводники, по которым электрический ток подается от генераторного устройства к месту потребления

энергии, обычно обладают некоторым сопротивлением, и на преодоление его расходуется часть основной электродвижущей силы, развиваемой в генераторном устройстве. Падение напряжения в подающих энергию проводах (самоиндукцией проводов пренебрегаем), будучи умножено на силу тока, дает мощность, непроизводительно теряемую в проводах на их нагревание. Эти потери принято выражать в процентах от полной мощности, посылаемой генераторным устройством на линию передачи и слагающейся из мощности, подводимой к концу линии, и из мощности, теряемой в проводах линии. Необходимо, далее, принять во внимание, что *одна и та же полная мощность может выражаться либо произведением сравнительно низкого напряжения на большую силу тока, либо произведением высокого напряжения на очень малую силу тока*. Но количество джоулева тепла (см. § 42), развиваемого в проводах, в большой степени зависит от силы тока и быстро уменьшается с убыванием силы тока. Следовательно, для уменьшения бесполезной траты энергии на нагревание проводов линии, вообще говоря, *при передаче некоторой определенной мощности и при данном сопротивлении проводов, выгодно использовать как можно меньшую силу тока и соответственно как можно большее напряжение*.

Рассмотрим в виде примера случай передачи энергии простым переменным током при коэффициенте мощности, равном единице. Допустим, что генераторная станция и ее повысительное трансформаторное устройство могут отдавать в линию передачи мощность в 5 000 киловаттов и что полное сопротивление обоих проводов линии равно 20 омам. В ниже следующей таблице приведены сравнительные данные для различных напряжений, подаваемых на линию (первый столбец). Во втором столбце даны соответствующие силы токов, которые, будучи умножены на напряжение, выражают данную неизменную мощность (5 000 киловаттов=5 000 000 ваттов). В третьем столбце даны падения напряжения в линии передачи, получаемые простым перемножением силы тока на сопротивление линии (20 омов). В четвертом столбце приведены потери на линии передачи в процентах от полной мощности в 5 000 киловаттов. Нетрудно видеть, что доля полной мощности, составляемая этими потерями, просто получается делением падения напряжения в линии (третий столбец) на соответствующее полное напряжение (первый столбец). Умножая полученное частное на 100, получаем потери в процентах от полной мощности. Наконец, разность между 100 и числами, стоящими в четвертом столбце, представляет собой отдачу, или коэффициент полезного действия линии передачи в процентах от полной мощности. В пятом столбце и приведена

Напряжение в вольтах	Сила тока в амперах	Падение напряжения в линии передачи в вольтах	Потери в линии в %	Отдача линии в %
10 000	500	10 000	100	0
14 000	357	7 140	51	49
20 000	250	5 000	25	75
25 000	200	4 000	16	84
30 000	167	3 340	11	89
50 000	100	2 000	4	96
100 000	50	1 000	1	99

эта отдача, показывающая, сколько процентов полной мощности, поступающей в линию передачи, доходит до конца данной линии, т. е. до приемного пункта, например до главной понизительной подстанции. Некоторые числа в таблице ради упрощения даны с округлением (приблизительно).

Как указано в таблице, если исходить из напряжения в 10 000 вольт, при полной мощности в 5 000 киловатт и сопротивлении линии передачи, равном 20 омам, то вся данная мощность полностью пойдет на нагревание проводов линии, т. е. потери в линии равны 100%, а отдача линии равна 0%. Следовательно, в данном случае применение напряжения в 10 000 вольт совершенно не имеет смысла. Однако по мере повышения избранного для передачи энергии напряжения (первый столбец) результаты получаются все более и более благоприятные. Уже при 14 000 вольт отдача линии становится равной 49%, т. е. почти половина полной мощности может быть использована на конце линии. При напряжении в 20 000 вольт отдача достигает 75%, а потери снижаются до 25%, т. е. только $\frac{1}{4}$ полной мощности бесполезно теряется в линии передачи. При дальнейшем повышении избранного напряжения результаты получаются еще более благоприятные. При 30 000 вольт отдача линии равна 89%, а потери равны 11%, т. е. непроизводительно терется в линии всего лишь около $\frac{1}{10}$ полной мощности. Еще лучше результаты при 50 000 вольт, когда отдача достигает 96%, а потери соответственно равны 4%. Наконец, при 100 000 вольт потери в линии падают до 1%, а 99% полной мощности доходят до приемного пункта.

Рассмотренный пример ясно показывает преимущество высокого напряжения для электрической передачи энергии. При данной передаваемой мощности потери на нагревание проводов линии, обладающей некоторым определенным сопротивлением, быстро убывают, а отдача линии соответственно быстро возрастает по мере повышения напряжения. Было бы, однако ошибочно заключить на основании этого, что всегда

надо стремиться к применению самых высоких напряжений, какие только существуют в современной электротехнической практике. Оказывается, что по мере повышения напряжения растут первоначальные расходы на сооружение линии передачи, так как удорожается изоляция проводов линии и увеличиваются размеры столбов и опор. Кроме того возрастает стоимость повысительных и понизительных трансформаторов и ряда вспомогательных устройств. В связи с этим повышение напряжения сопровождается повышением ежегодных расходов на поддержание в исправном состоянии как самой линии передачи, так и всех дополнительных устройств, и при некотором достаточно высоком напряжении такого рода ежегодные расходы могут уже не покрываться выгодами от уменьшения потерь на нагревание проводов линии передачи. Все это накладывает известные ограничения при выборе подходящего высокого напряжения для передачи энергии. Практически стремятся к достижению наиболее выгодного с экономической точки зрения решения, которое сводится к тому, чтобы сумма всех ежегодных расходов, связанных с сооружением линии передачи и с уходом за ней, а также с потерей энергии на нагревание проводов, имела, по возможности наименьшее значение. Путем надлежащих расчетов в каждом частном случае находят наивыгоднейшее решение. При этом, конечно, считаются с тем, на какие именно напряжения промышленность обычно изготавливает трансформаторы и другие необходимые части всего высоковольтного устройства в целом. Как мы указывали уже выше, для электрической передачи энергии в настоящее время чаще всего применяются напряжения в 110 и 220 киловольт. В отдельных случаях допускается напряжение около 60 киловольт, а также напряжение около 160 киловольт.

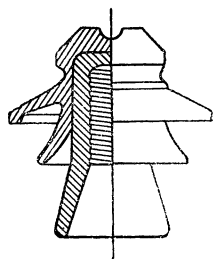
В современной практике допускают в линиях передач потери порядка 5—6% и даже несколько выше. Опыт большого числа осуществленных линий передачи показывает, что именно при указанной величине потерь более или менее достигаются наивыгоднейшие с экономической точки зрения условия. Что касается выбора толщины проводов или соответствующего данной толщине поперечного сечения проводов линии передачи, то в этом отношении обычно руководствуются существующими нормальными сечениями, для которых установлены нагрузки (силы тока), допустимые с точки зрения нагревания проводов. В каждом частном случае, в зависимости от требуемой силы тока и иных обстоятельств, подбирают ближайшее нормальное сечение.

Остановимся теперь на так называемых воздушных линиях передачи, при устройстве которых применяются голые провода, подвешиваемые на столбах или

на особых спорах при помощи специальных высоковольтных изоляторов.

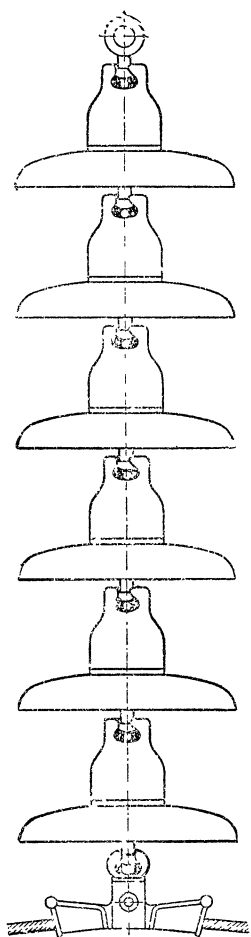
В настоящее время для воздушных линий передачи применяются медные или алюминиевые провода, обычно представляющие собой так называемые многопроволочные провода, свитые из более или менее тонких проволок. Как было уже указано в § 44, при высоких напряжениях может возникать явление короны, т. е. светящегося в темноте слоя, окружающего провода. Корона образуется в связи с некоторой утечкой тока через воздух между проводами, и эта утечка оказывается тем больше, чем меньше диаметр проводов. Для избежания этого вредного явления, вызывающего бесполезную трату энергии, стремятся применять возможно больший диаметр проводов. Однако, при этом будет чрезмерно расходоваться дорогостоящий металл — медь или алюминий. В связи с указанным разработаны различные конструкции¹ проводов для линий передачи, позволяющие достигнуть повышения полного диаметра проводов без лишнего расходования ценного металла. Применяют, например, так называемые стале-алюминиевые провода, представляющие собой стальной канат, обвитый снаружи алюминиевыми проволоками. В последнем случае достигается еще то преимущество, что стальной канат, не играя существенной роли в проведении тока ввиду сравнительно большого электрического сопротивления, значительно увеличивает механическую прочность составного провода. Сам по себе алюминиевый провод недостаточно прочен и не допускает применения очень больших пролетов, т. е. расстояний между опорами. В стале-алюминиевом проводе этот недостаток устранен.

Высоковольтные изоляторы, применяемые для подвешивания проводов линий передач, обычно делаются из фарфора и бывают двух типов: штыревые и подвесные. На фиг. 101 изображен один из наиболее употребительных штыревых изоляторов. Самое название подобных изоляторов связано с тем, что они насаживаются на стальные или деревянные, пропитанные парафином, штыри (стержни), которые надлежащим образом крепятся на поперечинах столбов и опор. Линейный провод кладется в соответствующий желоб сверху изолятора и удерживается на его головке при помощи



Фиг. 101. Высоковольтный штыревой изолятор.

¹ Латинское слово «конструкция» обозначает «составление», «построение».



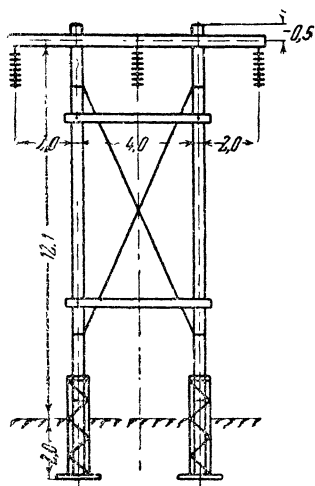
Фиг. 102. Гирлянда из шести высоковольтных подвесных изоляторов.

вязательной проволоки или особых металлических захватов. Первоначально штыревые изоляторы применялись для линейных напряжений до 60 и даже до 90 киловольтов. В настоящее время область их применения обычно ограничивается 30—40 киловольтами, а при более высоких напряжениях пользуются исключительно подвесными изоляторами (фиг. 102), собираемыми в так называемые гирлянды¹. В зависимости от конструкции этих изоляторов они подвешиваются один под другим при помощи тех или иных металлических частей. Верхний изолятор гирлянды подвешивается к поперечине опоры, а к нижнему изолятору присоединяется специальное захватное приспособление, прочно удерживающее линейный провод. Число подвесных изоляторов в гирлянде берется в соответствии с величиной линейного напряжения. При напряжении в 110 киловольтов обычно применяют от 6 до 10 изоляторов на гирлянду.

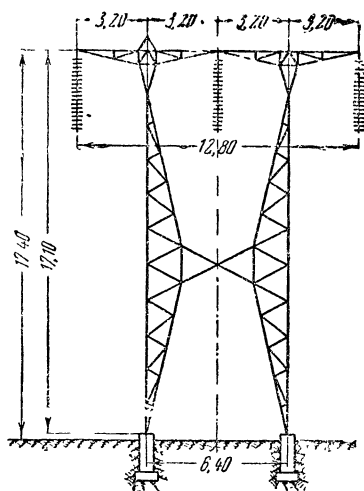
В современных условиях для воздушных линий передачи применяются деревянные или стальные опоры. Простейший вид деревянной опоры представляет собой обычный столб, снабженный в верхней части поперечинами для укрепления изоляторов. Однако, по мере повышения линейного напряжения и увеличения механической нагрузки на опоры в целях усиления их применяют теперь сложные деревянные опоры вроде изображенной на фиг. 103. В наиболее ответственных случаях, а также при подвешивании на одном и том же ряде опор двух параллельно идущих трехфазных линий

передачи (6 проводов), применяются стальные опоры более или менее сложной конструкции, примеры которой представлены на фиг. 104 и 105. В некоторых случаях применяются одновременно и деревянные и стальные опоры. При этом в местах, где требуются особо прочные опоры (при переходах

¹ Французское слово «гирлянд» обозначает «длинное сплетение» (из цветов или из зелени).

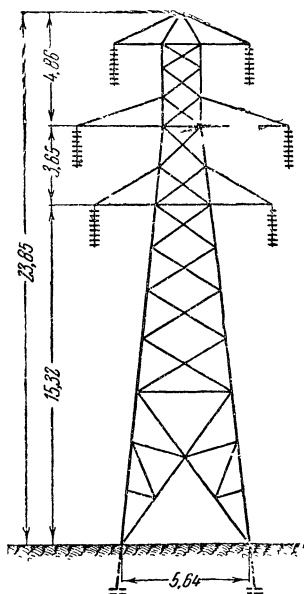


Фиг. 103. Деревянная опора для высоковольтной линии передачи электрической энергии.

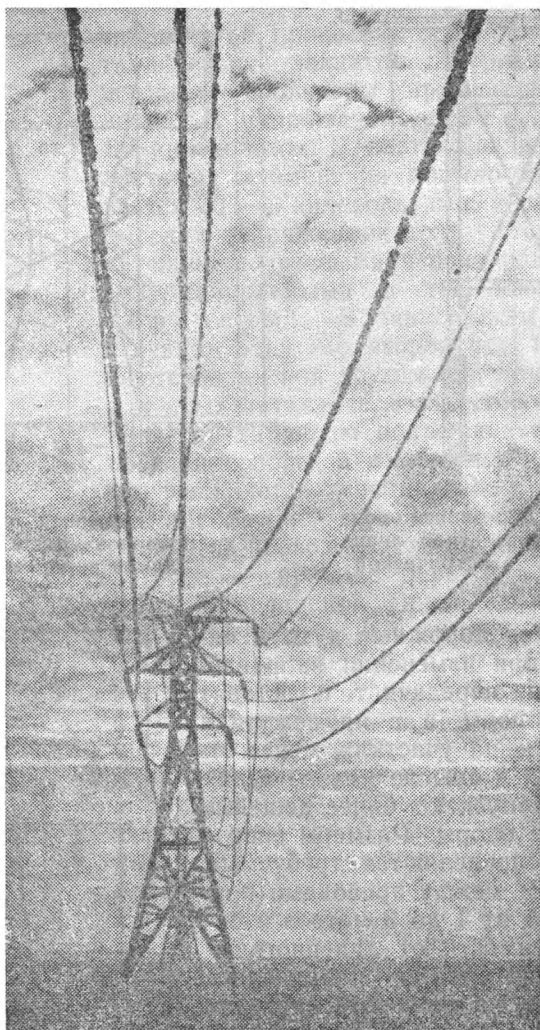


Фиг. 104. Железная опора для трех проводов высоковольтной линии передачи.

через железнодорожные пути и через реки, при изменении направления линии передачи т. п.) ставят стальные опоры, а в промежутках между ними, на участках, менее ответственных в смысле механических нагрузок, допускают более дешевые деревянные опоры. Размеры опор в основном определяются требуемым расстоянием между проводами (приблизительно от 1 до 3 метров и более (в зависимости от линейного напряжения), а также наименьшим допустимым расстоянием проводов от земли (от 6 до $7\frac{1}{2}$ метров). Расстояния между опорами, т. е. так называемые пролеты, бывают весьма различные. При деревянных опорах пролеты доходят до 80—100 метров. При железных опорах допускаются значительно большие пролеты, которые при переходе через широкие реки и в горных районах доходят иногда до нескольких сот метров.



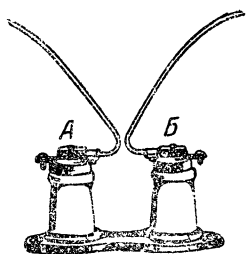
Фиг. 105. Железная опора для шести проводов (двойная трехфазная линия передачи).



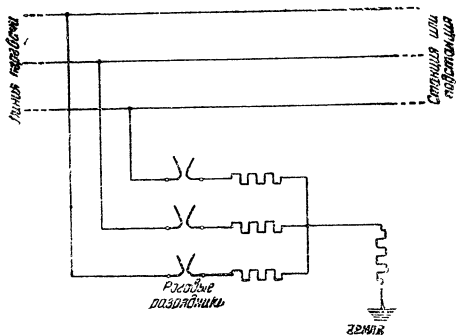
Фиг. 106. Общий вид трехфазной высоковольтной линии передачи. $3 \times 2 = 6$ проводов. Два заземленных троса. Провода и тросы особенно отчетливо видны, благодаря осевшему на них инею.

В виде примера на фиг. 106 представлен общий вид трехфазной линии передачи.

На фиг. 106 над проводами линии передачи видны заземленные тросы, представляющие собой канаты из стальной оцинкованной проволоки и соединяющие верхушки



Фиг. 107. Роговой разрядник.



Фиг. 108. Общая схема защитных устройств на конце линии передачи.

опор одну с другой. Такого рода стальные тросы имеют известное значение в механическом отношении, так как они увеличивают устойчивость опор, что особенно важно на случай обрыва проводов линии передачи. Но главная роль заземленного троса заключается в предохранении проводов от непосредственных ударов молнии и вообще от всяких внешних влияний со стороны атмосферного электричества. В этом отношении действие заземленного троса подобно действию громоотвода (см. § 44, гл. 4). В связи со сказанным принимают соответствующие меры для надежного заземления металлических опор, к верхней части которых непосредственно прикрепляется стальной трос. При деревянных опорах заземление троса производится через каждые 300 — 400 метров при помощи особого вертикального проводника, спускающегося вдоль опоры и присоединенного, например, к металлическому листу, закопанному во влажную почву на глубине 3 — 4 метров. Подобным же образом соединяется с влажной почвой и нижняя часть каждой металлической опоры.

При сооружении воздушной линии передачи помимо заземленного троса применяются и иные защитные устройства, целью которых является предохранение всех частей электрической цепи от последствий грозových разрядов. Между прочим, для защиты присоединенных к началу и концу линии повысительных и понизительных трансформаторов, а также других частей подстанций на этих подстанциях устанавливают так называемые разрядники. На фиг. 107 изображен роговой разрядник, являющийся простейшим устройством этого рода. Он имеет искровой промежуток между двумя толстыми медными проволоками (рогами) А и Б, закрепленными на особых опорных изоляторах и отогнутых в разные стороны. Один рог, например А, хорошо заземляется (обычно через некоторое сопротивление), а другой, Б, присоединяется к одному из проводов линии передачи (фиг. 108).

Искровой промежуток устанавливается такой величины, чтобы при нормальной работе линии передачи, т. е. при нормальном напряжении, которое может быть между проводом линии и землей, этот промежуток еще не перекрывался искрой. Но как только в линии возникнет перенапряжение (вследствие грозового разряда), между рогами появится более или менее мощная искра, переходящая в вольтову дугу, которая потоком восходящего теплого воздуха поднимается вверх и, растягиваясь между отогнутыми в разные стороны концами рогов, гаснет сама собой. Назначение добавочного сопротивления заключается в уменьшении мощности дуги. Начало и конец каждого провода воздушной линии передачи обязательно снабжаются описанным разрядником или иным, подобным ему по своему действию.

Для отвода в землю зарядов, сравнительно медленно возникающих на проводах воздушной линии передачи под влиянием надвигающихся грозовых облаков (электризация через влияние; см § 21, гл. 2), оказывается целесообразным присоединять к земле нейтральную точку соединенных звездой высоковольтных трансформаторных обмоток, непосредственно приключаемых к линии передачи. Это заземление нейтральной точки иногда осуществляется через некоторое сопротивление (простое омическое или обладающее заметной индуктивностью).

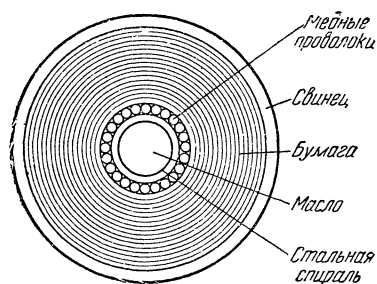
Таким образом при сооружении линии передачи принимается целый ряд мер предосторожности против вредного действия ненормальных условий работы линии, могущих возникнуть от разных причин. Как было выше указано, перенапряжения на линии передачи могут появиться как результат воздействия атмосферного электричества (грозовые разряды, электризация через влияние). С другой стороны, перенапряжения в линии передачи нередко возникают в связи с разного рода авариями. Так, например, может произойти пробой какого-либо изолятора и появиться вольтова дуга в месте пробоя. Иногда перенапряжение, вызванное воздействием атмосферного электричества, может обусловить внешнее перекрытие изолятора или целой гирлянды изоляторов вольтовой дугой. Вольтова дуга может возникнуть и непосредственно между проводами, когда при очень длинном пролете они под влиянием бокового ветра начинают раскачиваться и сближаться в случае несинхронного качания проводов. Во всех этих случаях неустойчивая вольтова дуга может порождать ненормальные очень частые добавочные колебания силы тока, и это обычно сопровождается значительными перенапряжениями в линии передачи. Наконец, вредные перенапряжения могут возникать и в связи с неустановившимся режимом переменного тока (см. § 52, гл. 4) при включении

линии передачи, а также при отключении ее. Цепь линии передачи обладает индуктивностью, и магнитный поток самоиндукции является носителем соответствующего запаса энергии. Кроме того провода обладают электрической емкостью. Между ними, а также между ними и землей существует электрическое поле, и это поле в свою очередь, обладает запасом энергии. Все эти запасы энергии в линии передачи, связанные с проводами

линии, вообще говоря, могут порождать более или менее значительные перенапряжения при всяком изменении установившегося режима. При проектировании и расчете линии передачи необходимо бывает строго учитывать указанные выше причины возможных перенапряжений и предусматривать соответствующие меры защиты.

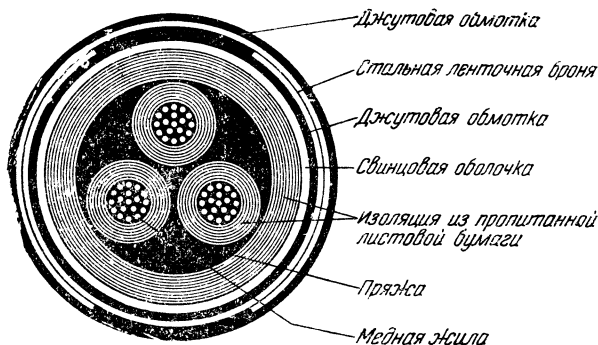
Для борьбы с перерывами в энергоснабжении, могущими иметь место в связи с различными авариями на линии передачи, помимо рассмотренных мер защиты весьма целесообразным оказывается сооружение не одной простой трехфазной линии (трехпроводной), а по крайней мере двух таких линий, хотя бы проложенных на общих опорах. При всякой аварии, вплоть до обрыва проводов, одна из двух параллельных линий отключается от общей цепи при помощи автоматических реле и быстродействующих масляных выключателей (см. § 56, гл. 5), а другая — исправная — линия временно принимает на себя всю нагрузку по снабжению энергией некоторого района и работает с повышенными потерями впредь до устранения происшедшей аварии.

За последние годы успехи высоковольтной техники выразились между прочим в построении столь хорошо изолированных и защищенных проводов, так называемых *кабелей*¹, что их можно укладывать в землю, осуществляя таким образом подземную линию передачи энергии при напряжениях около 100 киловольт и выше. На фиг. 109 изображен в виде примера поперечный разрез подобного высоковольтного кабеля с одной жилой. Этот кабель делается с



Фиг. 109. Разрез высоковольтного кабеля с масляной изоляцией. Одна жила.

¹ Слово «кабель» происходит от французского слова «кабль», первоначально обозначавшего просто «канат». В области электротехники «кабелем» принято называть сложный проводник, свитый из отдельных проволок и покрытый более или менее толстой изоляцией, а затем снаружи защищенный свинцовой (или свинцовой и стальной) оболочкой.



Фиг. 110. Трехжильный кабель с общей защитной оболочкой. Разрез.

полой медной ж и л о й, состоящей из ряда проволок, навиваемых на стальную спираль. Вокруг медной жилы накладывают много слоев пористой бумаги, а затем все окружается непроницаемой для воздуха свинцовой оболочкой. После прокладки кабеля под землей его хорошо просушивают, нагревая электрическим током медную жилу и вместе с тем продувая теплый сухой воздух сквозь канал внутри жилы. Наконец, заполняют этот канал жидким маслом (трансформаторным), которое пропитывает бумагу. Таким путем достигают высокой степени изоляции медной жилы кабеля.

Для трехфазной подземной линии передачи необходима прокладка трех отдельных одножильных кабелей с масляной изоляцией. При напряжениях, не превосходящих 40 киловольт, допускаются другие виды изоляции и все три жилы, надлежащим образом изолированные одна от другой, входят в состав одного т р е х ж и л ь н о г о к а б е л я с общей защитной оболочкой. Поперечный разрез такого кабеля представлен на фиг. 110.

59. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Производство электрической энергии в крупных установках, снабжающих районы значительной площади, естественно, привело к усложнению схемы канализации электрического тока. Первый, наиболее ответственный этап в этой канализации, а именно высоковольтную передачу энергии от места ее генерирования до главной трансформаторной подстанции, мы рассмотрели в предыдущем параграфе. Теперь вкратце остановимся на дальнейших этапах канализации электрического тока — на районных и местных распределительных сетях.

По способу выполнения распределительные сети, как и линии передачи, разделяются на воздушные и подземные

(кабельные). Районные распределительные сети, обычно работающие при напряжении порядка 35 киловольт, устраиваются в зависимости от обстоятельств — как воздушные, так и кабельные. Местные же распределительные сети (например городские) бывают почти исключительно кабельные, так как их приходится прокладывать в густо населенных местах, где открытая проводка при напряжении от 3 до 10 киловольтов представляет опасность. Только в сельских местностях, при значительной разбросанности приемников и сравнительно малой общей потребляемой мощности, допускаются воздушные распределительные сети местного значения, как более выгодные в экономическом отношении по сравнению с дорогостоящими кабельными сетями.

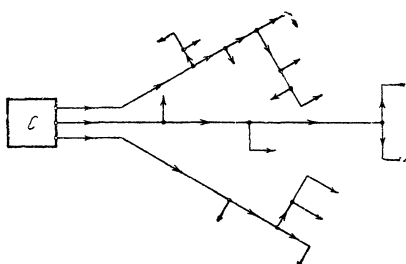
Для воздушных распределительных сетей применяются голые провода, подвешиваемые на соответственно небольших по размерам штыревых изоляторах, установленных на деревянных или железобетонных столбах, а также на стальных опорах облегченной конструкции. При напряжении в 35 киловольт (районные сети) иногда применяют подвесные изоляторы, обычно в виде коротких гирлянд, составленных из двух отдельных изоляторов. В качестве материала проводов берут медь, алюминий и — с целью удешевления местной сети — железо. В нижеследующей таблице приведены нормальные сечения голых проводов для открытой воздушной подвески и соответствующие им наибольшие силы тока, допустимые с точки зрения нагревания проводов.

В проложенных под землей кабелях, которые обычно имеют медные жилы, наибольшая допустимая нагрузка в трехжильных кабелях ввиду худших условий охлаждения, несколько меньше, чем для соответствующих голых проводов.

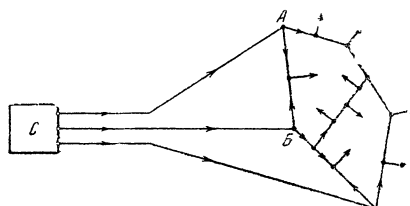
При расчете проводов распределительных сетей, районных и местных, руководствуются вышеуказанными допустимыми нагрузками и стремятся к тому, чтобы потери в этих сетях в общей сложности не превосходили примерно 5% от распределяемой по ним мощности.

По своему характеру распределительные сети (районные и местные) разделяются на разомкнутые и замкнутые. Разомкнутая сеть состоит из одной или нескольких не

Площадь сечения (в мм ²)	Наибольшая допустимая нагрузка голых проводов (в амперах)		
	Медь	Алюминий	Железо
4	46	35	16
6	60	45	20
10	86	65	30
16	118	90	40
25	162	125	55
35	206	155	72
50	266	205	95
70	340	260	120
95	420	320	150



Фиг. 111. Схема разомкнутой сети.



Фиг. 112. Схема замкнутой сети.

соединенных между собой главных линий, ведущих от генераторной станции или от трансформаторной подстанции к местам потребления электрической энергии. Основным признаком разомкнутой сети является то обстоятельство, что любой приемный пункт питается электрической энергией, распространяющейся по сети только в одном строго определенном направлении. На фиг. 111 в виде примера представлена схема некоторой разомкнутой сети¹. Здесь *C* генераторная станция или трансформаторная подстанция, от которой отходят питательные провода, так называемые фидеры², которые подводят электрическую энергию к важнейшим точкам сети, обычно именуемым питательными пунктами. Как показано на этой схеме стрелками, электрическая энергия движется по проводам разомкнутой сети везде в одном строго определенном направлении.

В случае замкнутой сети (фиг. 112) места потребления энергии соединены системой проводов, которые образуют замкнутые контуры. Основной признак замкнутой сети состоит в том, что любой приемный пункт может снабжаться электрической энергией, подводимой к этому пункту, по крайней мере, с двух сторон. Стрелками на схеме показано направление движения электрической энергии в тех частях схемы, где это совершенно несомненно. В тех частях замкнутого контура где стрелки не показаны, направление движения энергии может быть и то и другое, в зависимости от величины мощности, забираемой от замкнутой сети в различных приемных пунктах. Точки *A*, *B* и *B* являются питательными пунктами в рассматриваемой замкнутой сети. Электрическая энергия подается в эти питательные пункты фидерами — *CA*, *CB* и *CB*.

¹ На фиг. 111 и 112 три провода, необходимые при трехфазном токе, ради упрощения схем условно изображены одной простой линией, подобно тому, как мы уже делали это раньше (см. фиг. 99).

² По-английски «фидер» дословно значит «питатель», «питательное устройство».

Значительным преимуществом замкнутых сетей является их большая по сравнению с разомкнутыми сетями обеспеченность в смысле непрерывного снабжения приемников энергией. При порче одного из проводов сети возможно питание соответствующих приемных пунктов от другой части сети. При повреждении одного из фидеров он отключается от замкнутой сети, и питание ее может быть полностью и без всякого перерыва в электроснабжении обеспечено другими исправными фидерами. В связи со сказанным замкнутые распределительные сети сооружаются всегда, когда снабжаемые энергией район или местность имеют потребителей, особо заинтересованных в бесперебойности подачи тока.

Как было разъяснено в § 57, от местных распределительных сетей с напряжением от 3 до 10 киловольтов обычно питаются многочисленные трансформаторные будки, от которых отходят цепи низкого напряжения, непосредственно подводящие ток к приемникам.

Цепи низкого напряжения почти всегда выполняются в виде изолированных проводов, и только в малонаселенных местах для наружных частей этих цепей допускаются голые провода. Внутренняя же проводка осуществляется исключительно при помощи изолированных проводов. Для целей электрического освещения зданий внутренняя проводка обычно делается так называемыми шнурами, свитыми из двух изолированных гибких проводников, каждый из которых состоит из большого количества тонких медных проволок. Иногда требуется скрыть провода под штукатуркой и тогда они прокладываются в особых изоляционных трубках, заделанных в стену, причем провода выходят наружу только в местах установки ламп, выключателей и т. п. Внутри фабричных зданий, в особенности для подводки тока к электродвигателям, применяются отдельные два или три изолированных провода, прокладываемых на очень близком расстоянии один от другого на фарфоровых роликах. На таких же роликах прокладываются и шнуры. В случае заделки в стену изоляционных трубок сквозь них пропускают провода с повышенной изоляцией, причем допускается прокладка в одной трубке одновременно двух или трех таких проводов.

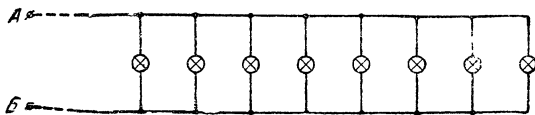
В нижеследующей таблице даны нормальные поперечные сечения изолированных медных проводов и соответствующие им наибольшие нагрузки, допустимые с точки зрения нагревания. В последнем столбце этой таблицы приведены также силы тока, на которые рассчитываются плавкие предохранители (см. § 42, гл. 4), всегда обязательно устанавливаемые в начале каждого провода определенного сечения, отходящего от провода большого сечения.

Площадь сечения (в мм ²)	Наибольшая допустимая нагрузка изолированного провода (в амперах)	Плавкий предохранитель на силу тока (в амперах)
3/4	9	6
1	11	6
1 1/2	14	10
2 1/2	20	15
4	25	20
6	31	25
10	43	35
16	75	60
25	100	80
35	125	100
50	160	125
70	200	160
95	240	190

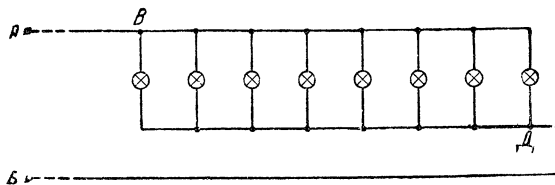
При расчете проводки низкого напряжения стремятся к тому, чтобы потери энергии в ней не превосходили 2—3%.

Приемники, непосредственно питаемые от цепей низкого напряжения, присоединяются к ним параллельно, как это показано на фиг. 113. Здесь 8 ламп накаливания питаются параллельно от общей цепи, подходящей от точек *A* и *B*. Если подобная цепь имеет сравнительно значительную длину и число присоединенных к ней в разных местах ламп довольно велико, то может оказаться, что наиболее удаленные лампы горят заметно сла-

бее, чем ближайшие к началу данной цепи лампы; на участке проводов между первой и последней лампами будет ощутимое падение напряжения, обусловленное нагрузкой ряда включенных ламп. Для устранения этого недостатка иногда применяют так называемое встречное включение (фиг. 114), при котором один провод цепи ламп питается в точке *B*, ближайшей от места, откуда подается энергия (вся цепь питается от точек *A* и *B*), а другой провод цепи ламп питается через наиболее удаленную точку *D*. В таком случае напряжения, при которых горят отдельные лампы, значительно менее отличаются одно от другого, чем при схеме включения, изображенной на фиг. 113.



Фиг. 113. Схема параллельного питания приемников.



Фиг. 114. Встречное включение в схеме параллельного питания приемников.

Для учета электрической энергии, расходуемой отдельными потребителями, например, квартирами, у самого ввода внешней цепи в данное помещение прежде всего ставят счетчик (см. § 48, гл. 4). После счетчика главные провода подводят к особой доске или щитку с плавкими предохранителями, устанавливаемыми с таким расчетом, чтобы каждый отходящий к приемникам проводник был защищен своим предохранителем. Благодаря этому при всяком повреждении одной из цепей внутренней проводки, сопровождающемся коротким замыканием, перегорают соответствующие плавкие предохранители, и эта неисправная цепь оказывается автоматически отключенной от главного ввода, а прочие внутренние цепи продолжают бесперебойно питаться электрической энергией. Плавкие предохранители перегорают также и в том случае, когда цепь сама по себе вполне исправна, но оказалась чрезмерно перегруженной присоединенными к ней приемниками, например, временным включением нагревательного прибора, на который данная цепь не рассчитана и нагрузка которого может вызвать опасное в пожарном отношении перегревание проводов этой цепи. Плавкие предохранители обычно изготавливаются в виде легко заменяемых частей, заключающих в себе специально рассчитанную проволоку или пластинку из металлического сплава, температура плавления которого сравнительно невелика. Наконец, всякая внутренняя проводка снабжается выключателями, позволяющими замыкать или размыкать цепь каждого отдельного приемника или цепь отдельной группы приемников, например, группы ламп накаливания, горящих одновременно.

При работе всей системы энергоснабжения в целом стремятся так регулировать возбуждение генераторов на главных станциях, чтобы напряжение в местах потребления энергии поддерживалось более или менее постоянным, независимо от потребляемой мощности. Обычно она в течение суток претерпевает значительные колебания, и соответственно этому полное падение напряжения (от генераторных станций до приемников) весьма заметно изменяется.

60. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОДСТАНЦИИ

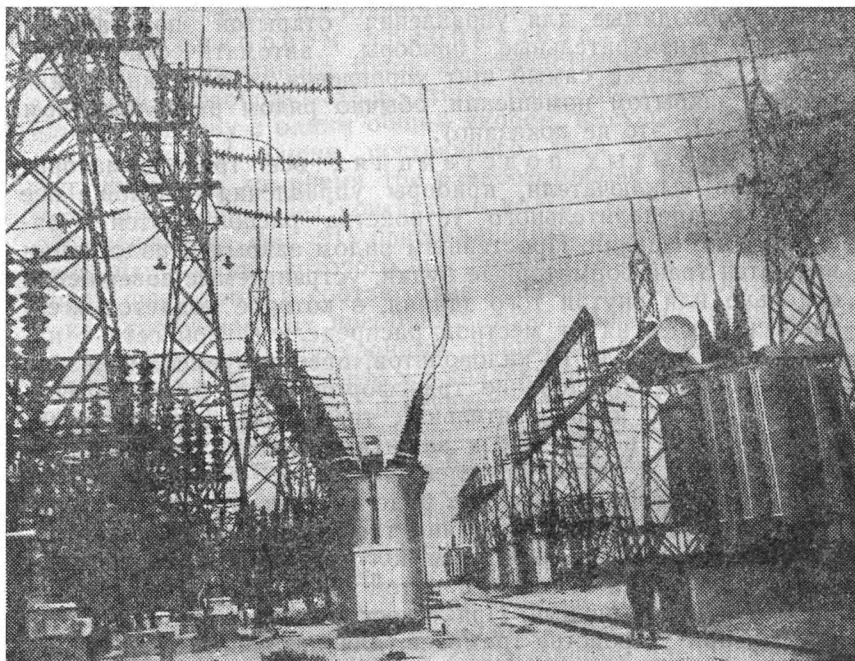
При рассмотрении общей схемы канализации электрической энергии от мест ее генерирования до мест ее потребления (§ 57, фиг. 99) мы упоминали о подстанциях как о необходимых звеньях всего устройства, передающего и распределяющего энергию. В случае применения трехфазного тока, играющего в современном электротехническом хозяйстве главную роль, основной частью каждой подстанции являются трансформаторы, служащие для преобразования

переменного тока одного напряжения в переменный же ток другого напряжения, но той же частоты (обычно в 50 герцев). Иногда для питания приемников требуется постоянный ток: например, для трамваев и электрических железных дорог. С экономической точки зрения в большинстве таких случаев бывает нецелесообразно строить самостоятельные генераторные станции постоянного тока. В этих случаях сооружают особые подстанции, питаемые от общих сетей трехфазного тока и заключающие в себе, кроме соответствующих трансформаторов, еще специальные устройства для преобразования переменного тока в постоянный.

Характер оборудования чисто трансформаторных подстанций (главных и вторичных) определяется теми напряжениями, на которые рассчитаны входящие и отходящие от этих подстанций линии. От величины напряжений на первичной и вторичной обмотках трансформаторов, а также от их мощности, зависят размеры и конструкция трансформаторов. Как мы уже упоминали в § 56 гл. 5, современные высоковольтные трансформаторы обычно помещаются в железные баки, заполненные специальным хорошо изолирующим жидким маслом (трансформаторным). Сверху эти баки плотно закрываются железной же крышкой с расположенными на ней проходными изоляторами из фарфора, сквозь которые выводятся наружу концы обмоток трансформатора. Внешний вид высоковольтных трансформаторов, заключенных в баки с изолирующим маслом, показан на фиг. 115, которая изображает общее расположение так называемой открытой подстанции. Такого рода подстанции за последнее время получили очень широкое распространение как в Западной Европе и Америке, так и в СССР.

В зависимости от мощности и напряжения подстанции открытого типа выполняются различно. Так, при малых мощностях (примерно до 20 киловаттов) и напряжениях, применяемых в местных распределительных сетях (порядка 3, 6 или 10 киловольтов), открытая подстанция принимает предельно упрощенный вид и сводится к одному трансформатору, помещенному в плотно закрытый масляный бак, который устанавливается на столбе или мачте. В верхней части столба или мачты непосредственно над трансформатором располагаются соответствующие штыревые изоляторы, служащие для закрепления концов проводов от местной распределительной сети и концов отходящей цепи низкого напряжения. Такие мачтовые подстанции находят применение в местностях, имеющих слабо развитую электрическую сеть.

Открытые подстанции большой мощности и на более высокие напряжения располагаются на специально отведенном участке земли. Трансформаторы и масляные выключатели



Фиг. 115. Общий вид высоковольтной открытой подстанции.

устанавливаются внизу на особых фундаментах (фиг. 115), а необходимая проводка высоковольтных цепей осуществляется над трансформаторами, причем для укрепления изоляторов сооружаются металлические опоры, поддерживающие горизонтальные решетчатые фермы¹ (балки). На этих фермах и располагаются подвесные или опорные изоляторы, а также все необходимые дополнительные части распределительного устройства (рога и другие защитные приспособления, разъединители и т. д.). Разъединители представляют собой сравнительно небольшие участки проводки, легко отделяемые в тех случаях, когда является необходимость на некоторое время совершенно изолировать, например, какой-либо поврежденный трансформатор от частей распределительного устройства, находящихся под высоким напряжением. Таким образом обеспечивается полная безопасность для лиц, работающих над исправлением поврежденной части подстан-

¹ Французское слово «ферм», которое в основном значит «твердый», «прочный», также применяется для обозначения составных (чаще всего металлических) балок и тому подобных частей, «служащих для перекрытия».

ции. Необходимые для управления открытой подстанцией приборы (измерительные приборы, автоматические реле и т. д.), а также самый щит управления устанавливаются в особом закрытом помещении, обычно рядом расположенном (на фиг. 115 это не показано).

В закрытых подстанциях все трансформаторы, масляные выключатели, приборы управления и вообще все части распределительного устройства располагаются в закрытом помещении. Простейшим видом закрытой подстанции являются трансформаторные будки, устраиваемые совершенно отдельно или внутри того здания, в которое подается электрическая энергия от местной распределительной сети с напряжением от 3 до 10 киловольт, преобразуемым в низкое напряжение. Оборудование трансформаторной будки обычно состоит только из понизительных трансформаторов с добавлением самых необходимых защитных приспособлений, предохранителей и разъединителей.

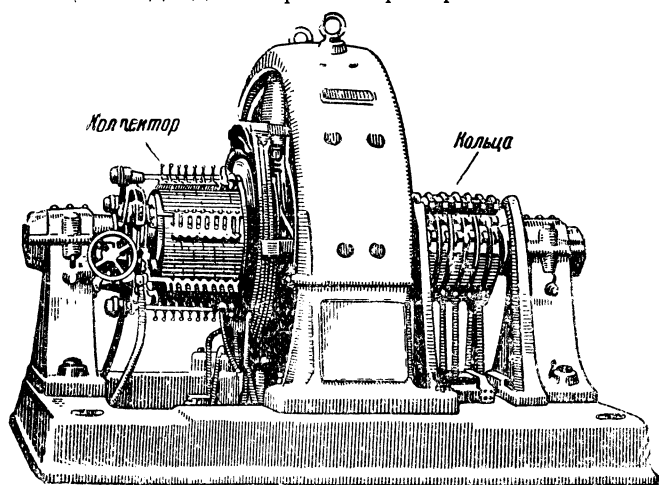
Как мы указывали выше, в ряде случаев для питания приемников электрической энергии требуется постоянный ток, который оказывается выгодным получать не от самостоятельных генераторных станций, а путем преобразования трехфазного тока в постоянный. Практически к этому прибегают, например, при устройстве трамваев, для питания которых применяется исключительно постоянный ток, в случае питания постоянным током междугородных электрических железных дорог, для разного рода электрохимических производств, а также в некоторых промышленных предприятиях (металлургических заводах и др.), имеющих электродвигатели постоянного тока. Во всех этих случаях устраивают так называемые преобразовательные подстанции.

На преобразовательных подстанциях для получения постоянного тока устанавливают двигатели-генераторы, одноякорные преобразователи или же особые ртутные выпрямители.

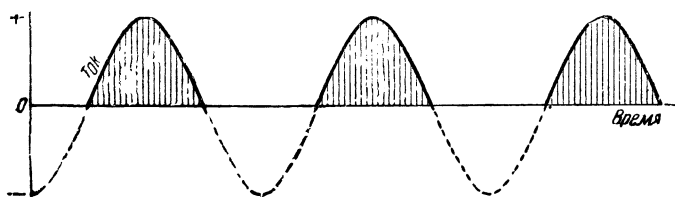
Двигатель-генератор представляет собой двигатель трехфазного тока, вал которого соединен с валом динамомашины постоянного тока. В данном случае двигатель трехфазного тока просто заменяет первичный механический двигатель (паровой или гидравлический), который был бы необходим при устройстве самостоятельной генераторной станции постоянного тока. Между напряжением трехфазного тока, питающего электродвигатель, и напряжением генерируемого динамомашиной постоянного тока нет никакой прямой зависимости. Цепи трехфазного и постоянного токов между собой совершенно не связаны. Общая схема превращений энергии состоит в следующем: в электродвигателе энергия трехфазного тока преобразуется в механическую работу, которая через общий

вал передается динамомашине и здесь преобразуется в электрическую энергию постоянного тока.

В одноякорном преобразователе цепи трехфазного и постоянного токов непосредственно связаны одна с другой. Преобразователь этого рода представляет собой единую машину с одним общим якорем, имеющим коллектор, как у обычных машин постоянного тока (см., например, фиг. 82). В то же время три равностоящие точки обмотки этого же якоря через контактные кольца (как в случае, изображенном на фиг. 91) присоединяются к цепи трехфазного тока, напряжение которого при помощи особых трансформаторов приводится в соответствие с напряжением постоянного тока, требуемого от преобразователя. Машина приводится во вращение, как синхронный двигатель трехфазного тока (см. § 65, гл. 8), от щеток же коллектора берется постоянный ток, который частично поступает непосредственно из цепи трехфазного тока, надлежащим образом переключаемой при помощи коллектора. Таким образом, одноякорный преобразователь представляет собой своего рода выпрямитель трехфазного тока. При этом выпрямлении благодаря синхронному вращению якоря и соединенного с ним коллектора положительная щетка всегда оказывается приключенной к той части обмотки, к которой направляется ток из трехфазной цепи. С целью уменьшения возможных колебаний постоянного тока обычно присоединяют к одноякорному преобразователю (через шесть контактных колец) провода от шестифазной цепи, легко получаемой при помощи простых трансформаторов, питаемых от цепи трехфазного тока. На фиг. 116 представлен общий вид одноякорного преобразователя.



Фиг. 116. Шестифазный одноякорный преобразователь.



Фиг. 117. Кривая переменного тока в цепи выпрямительной дуги.

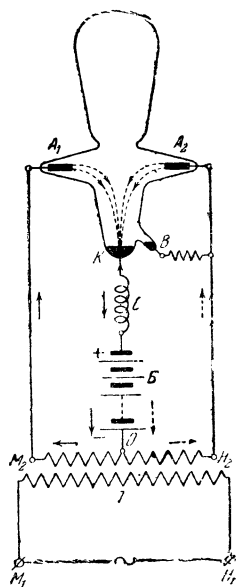
Ртутные выпрямители, получившие в современных условиях значительное распространение для целей преобразования переменного тока в постоянный, основаны на свойствах вольтовой дуги. Как было указано в § 44 (гл. 4), сущность явлений, происходящих в вольтовой дуге, состоит в излучении мощного потока электронов с поверхности раскаленного до высокой температуры пятна на катоде, т. е. на отрицательном электроде дуги. Если принять особые меры к тому, чтобы один из электродов дуги мог оставаться накалившимся, а другой всегда был более или менее холодным (например, если его специально охлаждать), то при питании вольтовой дуги от цепи переменного тока через промежуток между электродами дуги ток будет проходить только в течение тех полупериодов, когда накалившийся электрод оказывается катодом, холодный же электрод служит анодом.

На фиг. 117 представлена некоторая кривая переменного тока. Допустим, что верхние полупериоды соответствуют тому направлению тока в цепи вольтовой дуги, когда ее холодный электрод оказывается анодом, т. е. положительным, а горячий — катодом, т. е. отрицательным. В таком случае ток данного направления будет проходить через промежуток между электродами дуги. Другие же полупериоды (нижние) будут соответствовать обратному направлению тока, когда катодом оказывается холодный электрод, из которого электроны не излучаются. При таких условиях ток не может проходить через промежуток между электродами. Таким образом по цепи, содержащей вольтову дугу с горячим и холодным электродами, ток будет проходить только в одном направлении (заштрихованные площадки на фиг. 117). Однако, этот ток не будет идти непрерывно, а лишь, так сказать, толчками, с пропусками, по продолжительности практически равными времени полупериода. Подобный простейший дуговой выпрямитель может быть использован, например, для зарядки аккумуляторов. Однако, в ряде случаев подобный прерывающийся ток представляет некоторые неудобства. Желательно, чтобы не было периодических прерываний тока. Этого можно до-

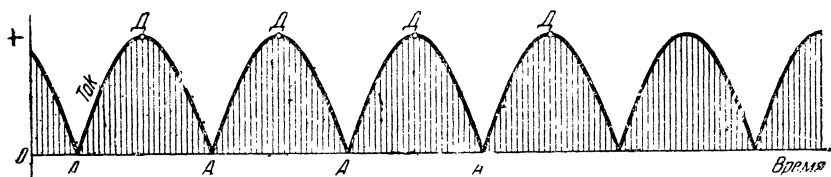
стигнуть, применяя несколько более сложную схему соединений, а также усложняя вольтову дугу, в которой против одного общего горячего катода располагают два, три и более холодных анодов.

Для получения вполне устойчивой вольтовой дуги, не требующей непрерывного наблюдения, в настоящее время обычно применяют так называемую ртутную вольтову дугу, горящую в стеклянном или железном сосуде, из которого выкачан воздух и в котором находятся только пары ртути. В нижней части сосуда располагают некоторое количество ртути, на поверхности которой образуется раскаленное катодное пятно. В верхней части сосуда укрепляются холодные аноды из железа (или из графита). Число холодных анодов берется в соответствии с применяемой схемой питания ртутного выпрямителя от цепи простого переменного или трехфазного тока. Ясно, конечно, что и нижний ртутный катод и железные (или графитовые) аноды надлежащим образом изолируются друг от друга и от стенок заключающего их сосуда, если он изготовлен из железа, а не из стекла.

На фиг. 118 представлена схема включения двуханодного ртутного выпрямителя в цепь однофазного переменного тока. Такого рода выпрямители предназначаются для сравнительно малых сил токов (приблизительно до 50 амперов в цепи постоянного тока) и для напряжений до 500 вольт. Они изготовляются в стеклянном сосуде более или менее сложной формы, в нижней части которого налито некоторое количество ртути K , играющей роль катода и присоединяемой к внешней цепи через посредство впаянной в стекло металлической проволоки. Несколько выше, в особых стеклянных отростках, расположены два анода A_1 и A_2 , представляющие собой цилиндры из графита, насаженные на концы проволок, впаянных в стекло. Питание выпрямителя производится от трансформатора T , первичная обмотка которого через зажимы M_1 и H_1 включается в цепь переменного тока; зажимы же вторичной обмотки M_2 и H_2 присоединены к анодам A_1 и A_2 . Приемник, потребляющий постоянный ток, получается от выпрямителя, включается между катодом K и зажимом O , соединенным со средней точкой вторичной обмотки

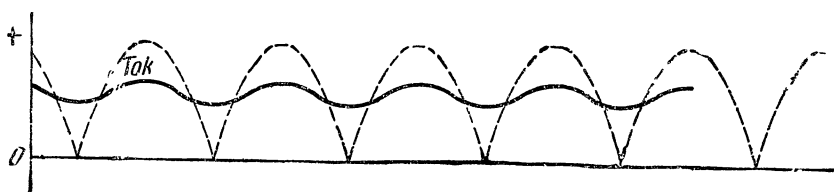


Фиг. 118. Схема однофазного ртутного выпрямителя.



Фиг. 119. Кривая тока, выпрямленного однофазным ртутным выпрямителем (без самоиндукции).

трансформатора. На рассматриваемой схеме приемник для примера представлен в виде аккумуляторной батареи B , поставленной на зарядку. Последовательно с приемником, между точками K и O , помещают обычно еще катушку C с достаточно большой самоиндукцией (индуктивностью), роль которой будет дальше выяснена. Для приведения ртутного выпрямителя в действие, т. е. для зажигания вольтовой дуги, служит вспомогательный анод B , состоящий в описываемом приборе из некоторого количества ртути, помещенной в особом стеклянном отростке, который отогнут книзу и расположен близ катода K . Вспомогательный анод B присоединяется к одному из крайних зажимов вторичной обмотки трансформатора T , в данном случае — к зажиму H_2 , через некоторое сравнительно большое сопротивление. Наклоняя сосуд выпрямителя вправо, создают кратковременный контакт между ртутью в K и B , а затем, при возвращении сосуда в первоначальное положение, этот контакт прерывается, и в этом месте образуется маломощная вольтова дуга. Под влиянием вспомогательной дуги образуется накалившееся пятно на поверхности ртутного электрода K , благодаря чему зажигаются главные вольтовые дуги между K и A_1 , с одной стороны, и между K и A_2 , с другой стороны. Соответственно двум полупериодам э. д. с., индуцируемой в правой и левой половинах вторичной обмотки трансформатора (OM_2 и OH_2), обе главные дуги вспыхивают по очереди, и ток через них всегда проходит в направлении от холодного анода (A_1 или A_2) к катодному пятну на ртутном электроде K . Следовательно, от K к точке O , т. е. через приемник B , непрерывно одна за другой стремятся идти посылыки тока в одном и том же направлении (фиг. 119). На схеме (фиг. 118) это и показано надлежаще направленными стрелками, сплошными с левой стороны (один полупериод) и пунктирными с правой стороны (другой полупериод). Кривая выпрямленного тока, представленная на фиг. 119, изображает ток в цепи приемника для случая, если бы последовательно с этим приемником не была включена катушка C с большой самоиндукцией. При наличии же этой катушки, ее самоиндукция препятствует периодическим коле-

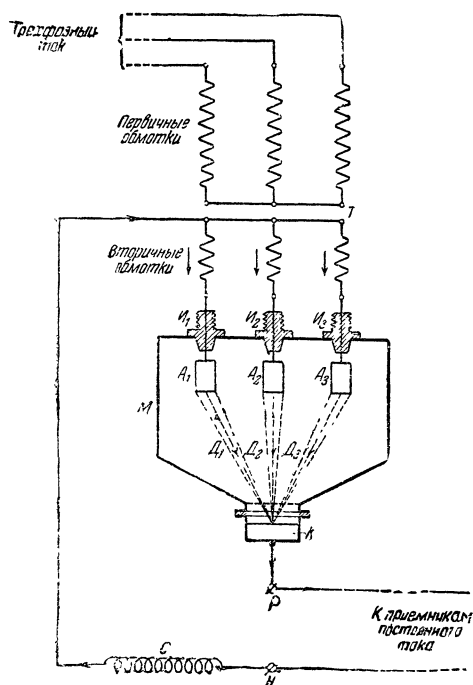


Фиг. 120. Кривая тока, выпрямленного однофазным ртутным выпрямителем (с самоиндукцией).

баниям проходящего через нее тока постоянного направления (см. § 50). Электродвижущая сила самоиндукции поддерживает в цепи приемника ток, когда он стремится упасть до нуля, в связи с переходом трансформаторной э. д. с. через нулевое значение (точки A, A, A на фиг. 119), и вместе с тем противодействует периодическому возрастанию тока до возможных наибольших значений (точки D, D, D на фиг. 119). В результате, под действием самоиндукции C , в значительной степени сглаживаются колебания тока в цепи приемника, как это и представлено на фиг. 120, где ради сравнения пунктиром изображена и кривая выпрямленного тока для случая отсутствия самоиндукции в цепи приемника (фиг. 119). Вместе с тем, благодаря отсутствию падений силы тока до нуля, катодное пятно все время сохраняется накалившимся. Если бы в цепи выпрямленного тока не было самоиндукции C (фиг. 118), то в моменты ослабления тока до нуля катодное пятно могло бы успеть охладиться и перестало бы испускать электроны, а в связи с этим ртутная вольтова дуга потухла бы, что в действительности и происходит при отсутствии или при недостаточной величине самоиндукции C .

Описанный двуханодный выпрямитель применяется обычно в сравнительно малых установках (подстанциях), предназначенных чаще всего именно для зарядки аккумуляторов, как это представлено на схеме фиг. 118.

На подстанциях, питающих приемники постоянного тока большой мощности (трамваи, электрические железные дороги и т. п.), ртутные выпрямители присоединяют к цепи трехфазного тока. С этой целью каждый ртутный выпрямитель снабжается тремя, шестью или даже двенадцатью главными анодами и включается в цепь трехфазного тока по схеме, в основном представленной на фиг. 121. На этой схеме ради простоты изображен треханодный выпрямитель. В случае большой мощности ртутные дуги обычно заключаются в металлический сосуд M , изготовляемый из железа (на которое ртуть не действует) и снаружи охлаждаемой водой. Воздух из сосуда M выкачивается особым насосом, действующим непрерывно для того, чтобы удалять следы воздуха,

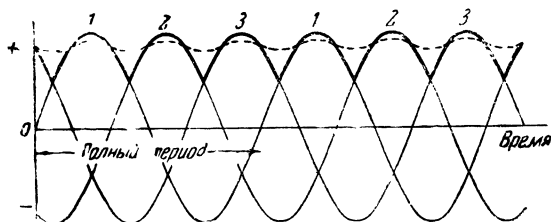


Фиг. 121. Схема трехфазного ртутного выпрямителя.

могущего просачиваться в сосуд через места укрепления проходных изоляторов I_1 , I_2 и I_3 и через изолирующую прокладку между сосудом M и железной чашкой со ртутью K , играющей роль катода в вольтовой дуге. Три железных или графитовых анода A_1 , A_2 и A_3 присоединяются к зажимам вторичных обмоток трехфазного трансформатора T , соединенных звездой. Приемники постоянного тока включаются между ртутным катодом K и нулевой точкой вторичных обмоток. Катушка C , обладающая большой самоиндукцией, вводится в цепь приемников с той же целью, как в схеме, изображенной на фиг. 118, т. е. для уменьшения периодических колебаний выпрямленного тока. Пер-

воначально образование катодного пятна на поверхности ртути K производится при помощи особого (не показанного на фигуре) железного же электрода, на короткий промежуток времени погружаемого в ртуть K при помощи электромагнитного механизма. После этого контакта подвижной электрод поднимается, и между ним и поверхностью ртути возникает вспомогательная вольтова дуга сравнительно малой длины и малой мощности. Данная дуга питается через некоторое сопротивление от небольшого добавочного трансформатора, вторичная обмотка которого одним концом соединена с этим подвижным электродом, а другим концом — с общим катодом K . Если цепь приемника, включенного между зажимами P и H , замкнута, то, как только зажжется вспомогательная вольтова дуга и на поверхности ртути K образуется раскаленное катодное пятно, тотчас же поочередно вспыхивают главные дуги D_1 , D_2 и D_3 , и выпрямитель начинает работать.

Каждая из главных дуг — D_1 , D_2 и D_3 — питается от соответствующей фазной обмотки трансформатора T и горит во время того полупериода, когда присоединенный к этой



Фиг. 122. Кривая тока, выпрямленного трехфазным ртутным выпрямителем.

обмотке анод приобретает положительный потенциал по отношению к общему катоду K . На фиг. 122 представлена кривая тока, протекающего через приемник, питаемый от описываемого треханодного ртутного выпрямителя. Цифрами 1, 2 и 3 обозначены кривые токов 1-й, 2-й и 3-й фаз, которые могли бы проходить через приемник при отсутствии односторонней проводимости ртутных вольтовых дуг. Сплошная толстая линия изображает кривую тока постоянного направления, получаемого от треханодного выпрямителя трехфазного тока, в случае отсутствия заметной самоиндукции в цепи приемников. По сравнению с фиг. 119 мы видим, что при выпрямлении трехфазного тока, даже при отсутствии самоиндукции в цепи приемников, ток в этой цепи никогда не падает до нуля, так как до того момента, когда положительный ток 1-й фазы делается равным нулю, успевает возникнуть положительный ток 2-й фазы и т. д. Остающиеся колебания выпрямленного тока в значительной степени сглаживаются самоиндукцией в цепи приемников, в особенности катушкой C (фиг. 121). Это и изображено на фиг. 122 пунктирной кривой. Ясно, конечно, что чем больше будет равноотстоящих фаз в данной системе переменного тока, тем более ровную кривую выпрямленного тока мы можем получить при помощи ртутного выпрямителя с числом анодов, равным числу фаз. При посредстве трансформаторов трехфазного тока, путем надлежащего соединения отдельных частей вторичных обмоток, легко можно получить шестифазный и даже двенадцатифазный ток. Поэтому, с целью достижения возможно меньших колебаний выпрямленного тока, обычно применяют шести- и двенадцатианодные ртутные выпрямители, работающие, по существу, так же, как и треханодный выпрямитель (фиг. 121), но только в несколько более сложной схеме. В связи со сказанным мощные ртутные выпрямители, работающие от цепей трехфазного тока, изготавливаются почти исключительно с 6 анодами, а нередко — с 12 анодами.

Ртутные выпрямители с металлическим сосудом, предназначенные для работы от цепей трехфазного тока, изготов-



Фиг. 123. Общий вид подстанции с ртутными выпрямителями большой мощности.

ляются в настоящее время для очень больших мощностей (до нескольких тысяч амперов в цепи постоянного тока при напряжениях от 500 до 6 000 вольтов и даже выше). Широкое распространение ртутных выпрямителей для самых разнообразных целей вызвано, с одной стороны, значительной надежностью их работы и, с другой стороны, их большой отдачей, т. е. большим коэффициентом полезного действия по сравнению с одноякорными преобразователями и в особенности с двигателями-генераторами. В случаях не слишком больших мощностей ртутные выпрямители трехфазного тока выполняются в стеклянных сосудах с 3 и 6 анодами, в основном — так же, как и двуханодный выпрямитель, изображенный на фиг. 118.

Общий вид подстанции с металлическими ртутными выпрямителями большой мощности изображен на фиг. 123.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

61. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ОБЛАСТИ СВОТОТЕХНИКИ

Одной из первых по времени областей широкого практического использования электрической энергии является светотехника. Различные явления, сопровождающие прохождение тока через твердые и газообразные проводники, открывают многие возможности для построения источников света, значительно более совершенных, чем этого можно было достиг-

нуть, непосредственно применяя для целей освещения горение твердых, жидких и газообразных веществ. В настоящее время разработаны и получили большое распространение электрические лампы разных типов. К рассмотрению их мы и перейдем в следующих параграфах, но предварительно коснемся вкратце некоторых основных вопросов светотехники вообще.

В практике осветительного дела нас всегда интересуют преимущественно два обстоятельства, имеющие особо важное значение. Во-первых, с каким бы источником света мы ни имели дело, прежде всего нам необходимо знать его силу света, обычно определяемую по сравнению с некоторым основным источником, осветительная способность которого принимается за единицу. Во-вторых, практически важно знать степень освещенности того или иного помещения, той или иной поверхности. Эта освещенность может быть весьма различна, в зависимости от расположения данных источников света и от ряда других обстоятельств.

За единицу силы света принимается так называемая свеча, установленная особыми международными соглашениями, в которых точно указано, как можно построить этот основной источник света. Свеча равна $1/60$ силы света, испускаемого 1 квадратным сантиметром черного тела при температуре расплавленной платины в момент ее затвердевания (в направлении — прямо от светящейся поверхности). Образцовые лампы, по сравнению с которыми определяют силу света разного рода источников, изготовляют в виде специальных ламп накаливания. Силу света таких образцовых ламп накаливания обычно подбирают так, чтобы она была равна 10, 35 или 100 свечам. Следует иметь в виду, что сила света, испускаемого каким-либо источником по различным направлениям, может быть весьма неодинакова. В связи с этим в образцовых лампах выбирают одно вполне определенное направление, которое и принимают при всякого рода измерениях силы света других источников. Для общей же оценки применяемых на практике источников или подробно обследуют, какова их сила света по разным направлениям, или чаще всего определяют среднюю силу света данного источника. Некоторые затруднения возникают в тех случаях, когда этот источник и образцовая лампа различаются по цвету испускаемого ими света. При их сравнении тогда приходится принимать специальные меры, простейшая из которых заключается в том, что свет от сравниваемых источников проходит сквозь надлежащим образом окрашенную прозрачную пластинку, благодаря чему оказывается возможным в значительной степени уравнивать цветовые впечатления, получаемые глазом от обоих источников.

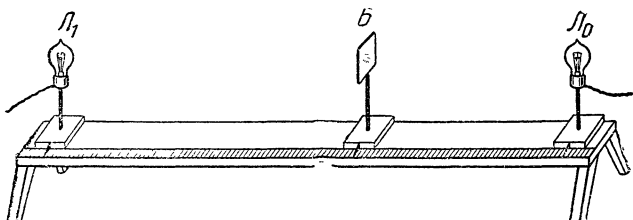
За единицу освещенности, на основании международных соглашений, принимается люкс¹, представляющий собой освещенность некоторой поверхности, на которую прямо (не наклонно) падает свет от источника, находящегося на расстоянии 1 метра от данной поверхности и обладающего силой света в 1 свечу. В виде примера можно указать, что для свободного чтения книги желательно иметь ее освещенность приблизительно в 50 люксов. В мастерских на обрабатываемых поверхностях требуется освещенность от 20 до 100 люксов, а в отдельных случаях — даже до 200 люксов. Освещенность тротуаров, приблизительно равная 2 люксам, считается достаточно хорошей. При полном лунном свете освещенность достигает $\frac{1}{4}$ люкса.

При всякого рода расчетах, касающихся освещения, а также при различных световых измерениях бывает необходимо знать основной закон, которому подчиняется освещенность. Само собой разумеется, что при прочих равных условиях освещенность увеличивается или уменьшается во столько раз, во сколько раз увеличивается или уменьшается сила света соответствующего источника. Что же касается зависимости освещенности от расстояния между источником света и освещаемой поверхностью, то с увеличением этого расстояния освещенность убывает и притом значительно быстрее, чем возрастает расстояние. Именно при увеличении расстояния в 2, 5, 10 и т. д. раз освещенность убывает в 4, 25, 100 и т. д. раз. В таком же отношении освещенность увеличивается при уменьшении расстояния между источником света и освещаемым предметом. Имея, например, источник в 1 свечу и приблизив его на расстояние $\frac{1}{10}$ метра, мы получим освещенность предмета, равную 100 люксам.

Зная этот закон освещенности, мы легко можем производить столь необходимое для практики сравнение сил света какого-либо источника и образцовой лампы. Приборы, служащие для производства такого сравнения, называются фотометрами². Обычный фотометр в основном состоит из так называемой скамьи с нанесенными на ней делениями для отсчета расстояний. В средней части этой скамьи устанавливается особое приспособление, позволяющее сравнивать освещенности, получаемые на этом приспособлении с двух сторон — от обоих сравниваемых источников света, которые располагаются у концов скамьи. В простейшем виде указанное приспособление для сравнения освещенностей представ-

¹ Это название происходит от латинского слова «люкс», обозначающего «свет».

² Название «фотометр» обозначает «измеритель света» и происходит от греческих слов: «фос» (родительный падеж — фотос) — «свет» и «метрoн» — «мера».



Фиг. 124. Фотометрическая скамья.

ляет собой, например, закрепленный в рамке листик тонкой бумаги, в средней части которой находится небольшое масляное пятно. Подобного рода фотометр изображен на фиг. 124. Здесь L_0 и L_1 —образцовая и исследуемая лампы, а B —рамка, поддерживающая бумажный листик с масляным пятном. Оказывается, что это пятно представляется темным, если освещенность задней стороны бумаги меньше, чем освещенность лицевой стороны, и, наоборот, пятно кажется светлым, если бумага освещена сзади сильнее, чем спереди. Если же бумага с обеих сторон освещена одинаково, то пятно совсем не выделяется, сливаясь с окружающими его другими частями бумаги. Передвигая в ту или другую сторону стойку с рамкой B и изменяя таким образом расстояния сравниваемых источников света L_0 и L_1 от бумаги с масляным пятном, всегда можно достигнуть равенства освещенностей обеих сторон бумаги с масляным пятном. О достижении этого равенства в описываемом фотометре судят по кажущемуся исчезновению пятна. Затем по линейке с делениями измеряют расстояния $L_0 B$ и $L_1 B$. Зная эти расстояния, а также зная силу света образцовой лампы L_0 , легко вычислить искомую силу света обследуемой лампы L_1 . Если, например, расстояние $L_0 B$ равно 100 сантиметрам и расстояние $L_1 B$ равно 200 сантиметрам, а сила света образцовой лампы L_0 равна 10 свечам, то получается:

$$\text{сила света лампы } L_1 = 10 \text{ свечей} \times \frac{200 \times 200}{100 \times 100} = 40 \text{ свечей.}$$

Подобным же образом производятся расчеты во всех других случаях.

В последнее время обращается серьезное внимание на правильное устройство электрического освещения с целью достижения надлежащей освещенности как различных помещений (фабричных, общественных и школьных зданий, жилых домов), так и открытых пространств (улиц и площадей, фабричных дворов, станционных железнодорожных путей и т. д.). Все это имеет большое значение в отношении повышения производительности труда, сохранности наших глаз, безопасности

движения и т. п. В связи со сказанным на практике приобретают все большее и большее распространение приборы, называемые люксметрами и служащие для измерения освещенности. Обычно люксметры изготавливаются в виде легко переносимых приборов с особой электрической лампочкой, питаемой от переносной же батареи. При помощи этой лампочки можно создать на некоторой поверхности различные предварительно измеренные освещенности, величина которых выражена в люксах. Затем с этими, так сказать, образцами освещенности тем или иным способом сравнивается обследуемая освещенность, производимая установленными для целей освещения лампами. Всякая более или менее ответственная установка электрического освещения должна время от времени проверяться при помощи люксметра, для того, чтобы не допускать понижения освещенности, в особенности на рабочих местах. Это понижение освещенности нередко происходит от уменьшения силы света ламп вследствие их старения, а также в связи с покрыванием пылью как самих ламп, так и разного рода колпаков, обыкновенно применяемых для надлежащего распределения света.

Колпаки бывают прозрачные и непрозрачные. Прозрачные колпаки изготавливаются чаще всего из молочного или матового стекла, открытые или закрытые. Непрозрачные колпаки обычно изготавливаются из тонкого эмалированного железа, причем та сторона этих колпаков, которая отражает свет помещенных в них ламп, обязательно делается белой. Иногда применяются сложные закрытые колпаки, состоящие из некоторой непрозрачной части, закрываемой прозрачным дном. В некоторых специальных случаях, в так называемых прожекторах¹, с целью возможно более совершенного направления пучка света, применяется непрозрачная часть колпака с зеркальной внутренней поверхностью, форма которой подбирается таким образом, чтобы свет от помещенного внутри источника отражался всеми частями кривого зеркала в одну сторону.

При устройстве электрического освещения следует стремиться к тому, чтобы в наши глаза свет не попадал непосредственно от ярко раскаленных частей лампы. Это, во всяком случае, необходимо соблюдать в отношении ламп, расположенных близ глаз. Если данное условие не выполнено, то глаза ослепляются и до известной степени теряют способность отчетливо видеть. Надлежащим применением соответствующих колпаков устраняется указанное вредное действие очень ярких источников света.

¹ Французское слово «проже́те» значит «отбрасывать», «отражать».

В зависимости от размещения источников света и от применяемых колпаков, рассеивающих свет или направляющих его в одну определенную сторону, освещение может быть общее, местное и смешанное.

При устройстве общего освещения сильные источники света подвешиваются или устанавливаются сравнительно высоко. При этом стены и потолок (в случае закрытых помещений) отражают и рассеивают значительную часть света, испускаемого лампами, так что нигде не получается слишком резких переходов от более освещенных к менее освещенным местам. Наилучшее общее освещение достигается применением непрозрачных колпаков, отражающих свет от ламп прямо на потолок, который в этом случае должен быть тщательно побелен. При более или менее равномерном освещении потолка, рассеивающего свет по всему помещению, почти полностью отсутствуют заметные тени. При надлежащем общем освещении на фабриках и заводах в значительной степени устраняется возможность несчастных случаев, происходящих нередко вследствие плохой освещенности как машин, так и проходов между ними. Почти во всех случаях общее освещение является основным, и проектирование его требует серьезного внимания.

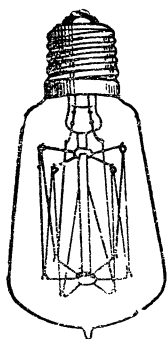
Местное освещение производится при помощи сравнительно низко расположенных ламп, свет от которых при помощи соответствующих колпаков, чаще всего непрозрачных, направляется непосредственно на то место, где выполняется какая-либо работа, требующая наблюдения. Если при наличии надлежащего местного освещения совершенно отсутствует общее освещение, то во многих случаях, в особенности на фабриках и заводах, это может быть сопряжено с некоторой опасностью.

Смешанное освещение, представляющее собой соединение общего и местного освещения, является наиболее целесообразным, и поэтому оно весьма часто применяется на практике.

62. ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

Наиболее распространенным в настоящее время электрическим источником света является лампа накаливания¹, в которой тонкая проводящая нить нагревается током до высокой температуры. Для предохранения накаливаемой нити от перегорания вследствие воздействия кислорода воздуха, ее помещают в стеклянный сосуд, из которого выкачан воздух. По-

¹ Лампа накаливания была изобретена нашим соотечественником А. Н. Лодыгиным (в семидесятых годах прошлого столетия) и затем усовершенствована американским изобретателем Эдисоном.



Фиг. 125. Пустотная лампа накаливания.

добным путем получается так называемая пустотная лампа. Применяется и другой способ предохранения нити: воздух в стеклянном сосуде заменяют каким-либо газом (злотом, аргоном и т. п.), не действующим химически на вещество нити. Такие лампы называются газополными лампами.

Первоначально лампы накаливания изготовлялись с угольными нитями, получавшимися при прокаливании без доступа воздуха разного рода волокон растительного происхождения. Ввиду того что угольные лампы накаливания отличаются сравнительно большим расходом электрической энергии, потребляя от 3 до 4 ватт на свечу, за последнее время эти лампы практически совсем вытеснены более совершенными лампами с нитью из тугоплавкого металла. Обычно в качестве такого металла берется вольфрам, температура плавления которого равна приблизительно $3\,000^{\circ}\text{C}$ (по стоградусной шкале). В то время как температура накала угольной нити не превосходит $1\,600^{\circ}\text{C}$, лишь в некоторых случаях достигая $1\,800^{\circ}\text{C}$, рабочую температуру вольфрамовой нити можно доводить до $2\,100\text{—}2\,200^{\circ}\text{C}$. Благодаря этому лампы с вольфрамовой нитью, т. е. так называемые вольфрамовые лампы накаливания, по своей световой отдаче значительно превосходят угольные лампы и потребляют на одну свечу около $1\frac{1}{2}$ ватта в случае пустотных ламп и около 1 ватта или несколько меньше в случае газополных ламп.

Вольфрамовые пустотные лампы (фиг. 125) снабжаются металлической нитью, отдельные прямолинейные участки которой поддерживаются крючками из тонкой тугоплавкой проволоки. Крючки заделываются на некотором расстоянии один от другого в стеклянную стойку, и между ними прокладывается нить накаливания, приобретающая вид ломаной линии. Стеклянная стойка, вместе с двумя подводщими ток более толстыми проволоками, вваривается в горло стеклянного сосуда лампы. На это же горло, плотно запаянное после откачки воздуха, насаживается при посредстве особого цемента так называемый цоколь B , представляющий собой металлический колпачок с винтовой нарезкой. В дно колпачка заделывается стеклянная или фарфоровая вставка C , в середине которой находится металлическая контактная часть K . К этим двум частям цоколя B и K припаиваются проволоочки, подводщие ток к концам вольфрамовой нити. Цоколь лампы нака-

¹ Французское слово «соколь» значит «основание».

ливания служит как для включения ее в цепь, так и для закрепления лампы в соответствующем держателе, называемом **ламповым патроном**. Патрон заключает в себе металлическую гайку, присоединенную к одному проводу цепи, а также изолированную и присоединенную к другому проводу опорную часть, расположенную таким образом, что при полном ввинчивании цоколя лампы в патрон контактная часть *К* к ней плотно прижимается. Иногда ламповый патрон снабжается и вделанным в него выключателем.

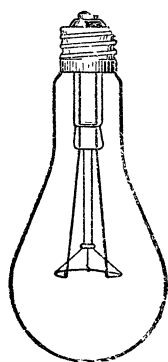
В настоящее время пустотные вольфрамовые лампы изготавливаются только на сравнительно небольшие силы света (от 10 до 20 свечей) и потребляют от 15 до 25 ватт при напряжениях в 110, 120 или 220 вольт.

Основной причиной, ограничивающей срок службы лампы с металлической нитью, является испарение вещества нити с ее поверхности. Это испарение, влекущее за собой разрушение нити, в высокой степени зависит от ее температуры. Оказывается, однако, что заполнение сосуда лампы каким-либо газом, не действующим химически на металл нити, уменьшает испарение нити в такой степени, что получается возможность повысить температуру ее, не уменьшая заметно срока службы лампы. Повышение же температуры нити выгодно в отношении увеличения световой отдачи лампы, т. е. в отношении понижения числа ватт, расходуемых на 1 свечу. В этом именно и заключается основная причина того, что в последнее время получили значительное распространение газополные вольфрамовые лампы. Общий вид газополной лампы представлен на фиг. 126. Вольфрамовая нить в такого рода лампе обычно сворачивается в тонкую спираль. Расстояние между витками спирали подбирается возможно меньшее, с таким, однако, расчетом, чтобы соседние витки не касались между собой. Спираль подвешивается к ряду крючков, заделанных в стеклянную ножку.

Газополные вольфрамовые лампы для постоянных осветительных установок изготавливаются на самые разнообразные силы света — от 10 до 1 500 свечей — и потребляют мощность от 10 до 1 000 ватт при напряжениях в 110, 120 и 220 вольт. Для специальных целей подобные лампы изготавливаются и на еще большие мощности.

Срок службы как пустотных, так и газополных ламп обычно бывает около 1 000 час.

На практике встречаются случаи, когда требуется применение ламп накаливания сравнительно малых размеров, напри-



Фиг. 126. Газополная лампа накаливания.

мер для автомобилей, для рудничных и иных переносных фонарей и т. п. Все подобные лампы обычно изготавливаются с вольфрамовой же нитью.

63. ДУГОВЫЕ ЛАМПЫ И ДРУГИЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Кроме ламп накаливания, в которых используется нагревание твердых проводников джоулевым теплом, для целей электрического освещения используются различные явления, сопровождающие прохождение тока через газообразную среду (см. § 44, гл. 4 — вольтова дуга и свечение разреженных газов при прохождении через них электрического тока).

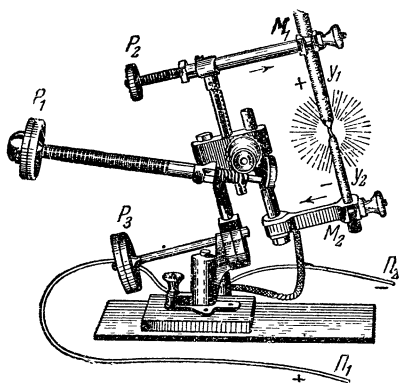
Вольтова дуга между угольными электродами в течение продолжительного времени играла весьма существенную роль в качестве электрического источника света¹. В связи с тем, что дуга обычно обладает сравнительно очень большой силой света, она чаще всего применялась для освещения открытых пространств (площадей, улиц и т. п.) и больших закрытых помещений (на фабриках и заводах, в общественных зданиях и т. д.)². В этой области своих применений вольтова дуга за последнее время практически совершенно вытеснена мощными лампами накаливания. В тех, однако, случаях, когда требуется источник света большой силы и с малой светящейся поверхностью, вольтова дуга между угольными электродами сохранила свое значение и до настоящего времени. Дело в том, что концы угольных электродов дуги имеют весьма высокую температуру. В особенности высокой температурой обладают те небольшие участки концов электродов, на которые непосредственно опирается сердцевина вольтовой дуги. Как было указано в § 44, гл. 4, при питании дуги постоянным током на угольном аноде, т. е. на положительном электроде, яркое пятно, называемое «кратером», имеет температуру около $3\,500^{\circ}\text{C}$. Катодное пятно имеет несколько меньшую температуру (около $3\,000^{\circ}\text{C}$). При переменном токе температура обоих ярких пятен на угольных электродах имеет некоторое среднее значение, меньшее $3\,500^{\circ}\text{C}$. В связи с этим для получения сильного источника света небольшой поверхности и соответственно

¹ Акад. В. В. Петров, открывший явление вольтовой дуги в 1802 г., совершенно четко указывает в своих статьях, что яркий свет, получаемый от этого источника, может быть использован для устройства электрического освещения. В. В. Петров (1761—1834) был одним из крупнейших исследователей явлений электрического тока, открытого А. Вольтой около 1800 г.

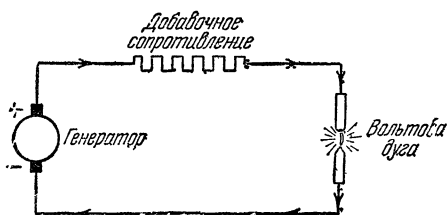
² Широкое распространение электрического освещения при помощи вольтовой дуги имело место в связи с изобретением П. Н. Яблочковым (1847—1894) так называемой «электрической свечи», свечи Яблочкова, в которой вольтова дуга получалась на конце двух параллельных угольных стержней, разделенных прокладкой из обожженной глины (каолина).

большой яркости пользуются обычно кратером на угольном аноде вольтовой дуги, питаемой постоянным током. Такого рода источники света требуются, например, для мощных прожекторов, служащих для получения сравнительно очень узких пучков света, могущего сильно освещать предметы, которые находятся на больших расстояниях, достигающих иногда нескольких километров. Для подобных применений вольтова дуга между угольными электродами оказывается, по крайней мере до настоящего времени, непревзойденным по силе и яркости источником света.

Одним из значительных неудобств, которым обладает вольтова дуга, применяемая в качестве источника света, является то обстоятельство, что угольные электроды непрерывно сгорают и расстояние между ними увеличивается. Этим нарушается устойчивое горение дуги, одним из условий которого необходимо считать именно по возможности строгое поддержание длины дуги (от нескольких миллиметров до десятков миллиметров, в зависимости от обстоятельств). Таким образом оказывается необходимым постоянно сближать угольные электроды по мере их сгорания. Для этого служат так называемые регуляторы, которые бывают ручные и автоматические. На фиг. 127 изображен ручной регулятор для вольтовой дуги, применяемый в тех случаях, когда человек может непрерывно следить за дугой и обслуживать ее. Угольные электроды $У_1$ и $У_2$, имеющие вид более или менее длинных стержней и часто называемые просто углями, закрепляются в металлических держателях $М_1$ и $М_2$, которые, при помощи системы зубчатых зацеплений и винта с рукояткой P_1 , могут быть сближаемы или раздвигаемы. Винт с рукояткой P_2 служит для правильной установки углей друг относительно друга. Наконец, вращением рукоятки P_3 держатели вместе с углями $У_1$ и $У_2$ могут быть поднимаемы вверх и вниз. При помощи проводов $П_1$ и $П_2$ регулятор вольтовой дуги включается в цепь соответствующего генератора, причем последовательно с дугой всегда вводится некоторое добавочное сопротивление по схеме, представленной на фиг. 128. Назначение этого добавочного сопротивления состоит в том, чтобы в известной степени ограничивать силу тока, протекающего



Фиг. 127. Ручной регулятор для вольтовой дуги.



Фиг. 128. Схема включения вольтовой дуги в цепь генератора.

положно металлическим проводникам, сопротивление которых не зависит от силы тока и падение напряжения в которых увеличивается по мере усиления тока. Иными словами, электрическое сопротивление вольтовой дуги значительно уменьшается по мере увеличения силы тока. Поэтому и приходится применять в цепи дуги обычное сопротивление (реостат) с таким расчетом, чтобы при случайном усилении тока добавочное падение напряжения в этом сопротивлении превышало уменьшение напряжения между электродами дуги. Практически напряжение дуги между угольными электродами колеблется около 40 вольтов. Сопротивление же реостата подбирается в соответствии с напряжением генератора, которое может быть равно, например, 60 или 110 вольтов.

Чтобы зажечь вольтовую дугу при помощи ручного регулятора (фиг. 127), вращают рукоятку P_1 , сближая углы до соприкосновения их концов. При этом замыкается ток в цепи, и сила его достигает значения, которое согласно закону Ома не превосходит внешнего напряжения, развиваемого генератором, деленного на сопротивление добавочного реостата. В месте кратковременного контакта между углями происходит сильное разогревание и, когда затем углы раздвигаются, из накаливаемого пятна на катоде начинает исходить мощный поток электронов, ударяющихся о близ расположенный конец анодного угля и разогревающих его до указанной выше температуры около $3\,500^{\circ}\text{C}$. Этот поток электронов и представляет собой основную часть явления вольтовой дуги, образующейся между концами углей. Кроме того электронный поток, проходя через воздух между концами углей, сильно его разогревает и ионизирует. Отрицательные ионы воздуха — в основном электроны — присоединяются к главному электронному потоку и движутся к аноду, а тяжелые положительные ионы ударяются о катод и своей кинетической энергией обуславливают нагревание катодного пятна, получающего тепло кроме того излучением от более раскаленного кратера и от весьма горячих газов дуги.

через вольтовую дугу. Сама же вольтова дуга этой способностью не обладает, так как обычно напряжение между ее электродами уменьшается по мере увеличения силы тока, т. е. вольтова дуга ведет себя в этом отношении прямо противо-

В случаях, когда ручное управление вольтовой дугой оказывается неудобным, применяются автоматические регуляторы, в которых необходимые передвижения углей при зажигании дуги и при дальнейшем ее горении производятся при помощи электромагнитных механизмов, стремящихся поддерживать неизменными как силу тока, протекающего через дугу, так и напряжение между ее электродами, зависящее от длины дуги¹.

Для получения более спокойного горения вольтовой дуги оказывается полезным применение в качестве положительного электрода не сплошного угольного стержня, а так называемого угля с фитилем. Такого рода фитиль, состоящий из смеси угольного порошка с солями калия, заполняет узкий канал, идущий вдоль всего угольного стержня по его середине. Прибавление к фитилю солей металлов бария, стронция и других дает сильное свечение (и окрашивание) раскаленных газов дуги, а также заметно повышает световую отдачу вольтовой дуги в целом, обычно называемой в таких случаях пламенной дугой. При питании вольтовой дуги переменным током (для общего освещения) принято снабжать оба угля фитилем, простым или пламенным.

Основной недостаток обычной вольтовой дуги как источника света, пригодного для общего освещения, недостаток, состоящий в необходимости применения сравнительно дорогостоящих регуляторов, а также в необходимости периодической замены сгоревших углей новыми, совершенно отсутствует в ртутных вольтовых дугах, сокращенно называемых ртутными дугами. В общем ртутная дуга была уже описана в § 60 (гл. 6) как основное явление, используемое в наиболее употребительных выпрямителях переменного тока. Для целей освещения ртутная дуга заключается в трубчатые сосуды из стекла или из кварца. Из этих сосудов выкачивается воздух, после чего они плотно запаиваются. При горении ртутной дуги свет излучается практически только ртутными парами, сквозь которые проходит ток. Ртутные дуги в качестве источников освещения представляют большой интерес в том отношении, что их световая отдача значительно больше ламп накаливания: они потребляют небольшую долю ватта на свечу, и в этом отношении возможны еще дальнейшие усовершенствования.

Свет кварцевых ртутных дуг богат лучами, способными производить сильное фотографическое действие. Поэтому подобные дуги уже давно нашли себе широкое применение в

¹ Первые автоматы-регуляторы, контролировавшие силу тока и напряжение, построены русским изобретателем В. Н. Чиколевым (1845—1898).

светокопировальных устройствах и при киносъемках. Однако, указанные лучи сильно действуют на глаза и кожу (особенно вредны для глаз). Действие света кварцевых ртутных дуг на кожу вызывает ожог и загар. В медицинской практике подобная лампа, под названием «горного солнца», с успехом применяется для лечения ряда заболеваний, причем, конечно, строго следят за тем, чтобы количество «кварцевого света», воздействующего на больной орган, не превосходило в каждом частном случае некоторого дозволенного предела. Для целей же общего освещения приходится принимать меры к предварительному поглощению вредных для глаз лучей какими-либо прозрачными оболочками, окружающими ртутную дугу. Обычное стекло как раз сильно поглощает вредные для глаз лучи ртутной лампы, и потому именно применение надлежащих стеклянных сосудов и оболочек облегчает использование ртутных дуг для обычного освещения. В этом случае приходится считаться еще с одним недостатком ртутной вольтовой дуги: свет ее имеет особенную зеленоватую окраску, сильно отличающую ее от других привычных источников света. Предметы, освещенные ртутной дугой, кажутся окрашенными в неестественные цвета: красное представляется черным, лица приобретают зеленовато-пепельный цвет и т. п. Все это неприятно действует на глаз. Оказывается, однако, что и этот недостаток ртутной дуги может быть устранен путем значительного увеличения давления ртутных паров в сосуде, в котором горит дуга при несколько повышенной силе тока и при соответственно более высокой температуре. В этом случае стекло оказывается недостаточно тугоплавким и прочным, и потому такого рода ртутные лампы изготавливаются в форме толстостенных кварцевых трубок с сравнительно небольшим внутренним диаметром. Благодаря высокой тугоплавкости и большой прочности кварцевых трубок, в них оказывается возможным допускать значительное повышение температуры и давления, практически доходящего до нескольких атмосфер. При этом окраска света ртутной дуги становится значительно приятнее и привычнее для глаза, и такого рода лампы с успехом могут применяться для общего освещения, тем более, что с повышением давления и температуры световая отдача подобных ламп делается весьма высокой. Что касается вредных для глаз лучей, легко проходящих даже через толстые стенки кварцевой трубки, то их поглощают рядом трубчатых стеклянных оболочек, которыми окружают кварцевую ртутную дугу. Дуговые лампы описанного устройства разработаны в самое последнее время и еще не стали предметом массового применения. Однако, есть все основания полагать, что в ближайшем будущем ртутная

вольтова дуга нового типа приобретет немалое значение в качестве источника света для общего освещения.

Возможен еще один способ улучшения качества ртутных ламп, в которых используется не вольтова дуга, а сравнительно слабое свечение разреженных ртутных паров при прохождении через них электрического тока. Именно в таких ртутных лампах низкого давления можно добиться желательной окраски испускаемого лампой света, покрывая внутренние стенки сосуда специальным составом, сильно светящимся под действием разряда через ртутные пары. При надлежащем подборе этого состава в результате получается довольно интенсивное освещение, практически приближающееся по своей окраске к дневному освещению. В виду большой экономичности подобного рода ламп в настоящее время их начали производить электроламповые заводы. Надо полагать, что в скором времени эти новые лампы во многих случаях вытеснят обычные лампы накаливания.

В заключение вкратце коснемся непосредственного использования свечения разреженных газов при прохождении через них электрического тока (см. § 44, гл. 4). Работы в этом направлении ведутся уже давно. В настоящее время основанные на указанном явлении электрические источники света, так называемые газосветные лампы, получили широкое распространение пока только для специальных целей: в связи с тем, что источники света этого рода легко изготовлять в виде сравнительно длинных и тонких трубок из стекла, им легко можно придавать форму букв и целых надписей, а также форму каких угодно иных изображений. Поэтому такие трубчатые газосветные лампы весьма часто применяются для разного рода украшений наружных частей зданий, а также для осуществления очень отчетливо видных надписей на стенах зданий (вывески и т. п.). Окраска свечения подобных ламп в сильной степени зависит от природы разреженного газа, введенного в трубку: лампы с неоном дают свет красно-оранжевой окраски, аргон дает синевато-фиолетовую окраску, гелий—желтовато-розовую. Примесь водорода к аргону сообщает свету розовый оттенок. Примесь к неону паров ртути делает свет приближающимся к белому.

Газосветные лампы обычно питаются переменным током, подводимым через металлические электроды, впаянные на концах трубки. Требуемое повышенное напряжение порядка нескольких сот и иногда тысяч вольтов получается при посредстве небольших трансформаторов. Применяя надлежащим образом подобранные смеси газов и некоторую наивыгоднейшую степень их разрежения, изготовляют небольшие газосветные лампы, питаемые непосредственно от цепей на

110 и 220 вольтов и имеющие внешний стеклянный сосуд той же формы, что и обычная лампа накаливания (фиг. 126). Однако, сила света подобных небольших газосветных ламп пока еще весьма невелика и они недостаточно экономичны.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

64. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рассматривая вопрос о механическом взаимодействии проводника, по которому течет электрический ток, и некоторого внешнего магнитного потока (§ 46, гл. 4), мы уже указывали, что возникающее в данном случае движение практически используется в электродвигателях. Совершаемая при этом механическая работа производится за счет энергии электрического тока.

Всякий электромагнитный генератор тока обратим, т. е. может превращаться в электродвигатель, если надлежащим образом пропустить через него ток от другого источника. Для пояснения сказанного, рассмотрим более внимательно простейшую схему динамомашины постоянного тока (фиг. 82). Главными частями такой машины являются armатура или якорь, проводники которого через коллектор и неподвижные щетки могут присоединяться к какой угодно цепи, и электромагнит с полюсами N и S , создающий главный магнитный поток. Этот поток в основном проходит через расположенный между полюсами якорь и играет роль внешнего магнитного потока по отношению к его проводникам. Согласно закону Ленца (§ 46, гл. 4), когда данная машина работает в качестве генератора, направление тока, индуцируемого в проводниках armатуры, всегда таково, что возникающая сила механического взаимодействия этого тока с внешним магнитным потоком стремится препятствовать тому движению (вращению), благодаря которому индуцируется ток. Таким образом, если мы, оставляя неизменным внешний магнитный поток, пропустим через проводники armатуры постоянный ток того же направления, но от постороннего источника, то якорь начнет вращаться в противоположную сторону по сравнению с тем, что было при работе машины в качестве генератора. Необходимо при этом отметить, что благодаря наличию коллектора и непрерывно осуществляемой им коммутации (§ 54, гл. 5) направление тока в проводниках якоря все время будет сохраняться одно и то же, а следовательно, будут сохраняться неизменными общие условия, определяющие направление вращения якоря машины, работающей в ка-

чество электродвигателя. На фиг. 82 можно отчетливо проследить, что в случае замены приемника Π внешним генератором, посылающим постоянный ток через щетки $+$ и $-$ в обмотку якоря, при вращении этого якоря направление тока в левой и правой половинах его обмотки будет оставаться одним и тем же, так как по мере поворачивания якоря будет происходить переключение тока под щетками. Постепенно, одна за другой, новые и новые пластины коллектора будут подходить под щетки. Если направление тока будет такое, как это представлено на фиг. 82, то при главном магнитном потоке, идущем от полюса N к полюсу S , т. е. слева направо, якорь описываемой машины, работающей в качестве двигателя, будет вращаться против часовой стрелки. Если же направление тока будет обратное показанному на фиг. 82, то вращение якоря электродвигателя будет происходить по часовой стрелке. В этом можно убедиться, применяя правило левой руки (§ 46) к участкам проводников, находящимся в междужелезном пространстве, между полюсами N и S и железной основой якоря. Итак, при неизменном направлении главного магнитного потока и тока в обмотке якоря, машина-электродвигатель будет вращаться в обратную сторону по сравнению с тем, что было, когда та же машина работала в качестве генератора электрического тока. Все это находится в полном соответствии с законом Ленца и свидетельствует о том, что когда машина используется как генератор, механический двигатель совершает работу, преодолевая стремление машины вращаться в противоположную сторону, причем это стремление будет тем больше, чем сильнее электрический ток, генерируемый данной динамомашиной, т. е. чем больше развиваемая ею электрическая мощность. Механическая работа первичного двигателя превращается при этом в электрическую энергию тока. Когда же машина служит электродвигателем, приводя в движение какие-либо устройства (например, станки и т. п.), совершаемая механическая работа получается за счет притекающей к данной машине электрической энергии. Во всяком случае всегда и неизменно соблюдается закон сохранения энергии (см. § 3, гл. 1), т. е. ни электрическая энергия, ни механическая работа не могут быть получены сами собой, из ничего, но могут превращаться одна в другую с соблюдением точного соответствия между количествами той и другой.

Таким образом электродвигатель постоянного тока совершенно подобен электромагнитному генератору постоянного тока. Что касается возбуждения электродвигателей постоянного тока, т. е. способов питания электромагнита, создающего главный магнитный поток, то в этом отношении могут быть применены те же схемы, как и при возбуждении динамома-

шин-генераторов (см. § 54, фиг. 85—88). В обоих случаях возбуждение может быть независимое (фиг. 85), параллельное (шунт, фиг. 86), последовательное (сериес, фиг. 87) или, наконец, смешанное (компаунд, фиг. 88). Наиболее часто применяются электродвигатели с параллельным возбуждением, так называемые шунтовые двигатели, отличающиеся сравнительным постоянством скорости вращения при условии более или менее неизменного напряжения в цепи, питающей эти электродвигатели. При этом, в зависимости от потребности, простым регулированием силы тока, возбуждающего электромагнит, можно легко и в широких пределах подбирать ту скорость вращения, при которой двигатель должен работать. Делается это при помощи шунтового реостата, включаемого в цепь последовательно с обмоткой возбуждения (фиг. 86). Двигатель всегда вращается с такой скоростью, при которой индуцируемая в его якоре обратная э. д. с. почти равна напряжению в цепи, питающей двигатель. В тех случаях, когда электродвигатель при пуске в ход должен сразу же развивать большое усилие, например, в условиях электрической тяги на железных дорогах, на трамвайных линиях и т. п., обычно применяются электродвигатели с последовательным возбуждением (сериесные двигатели). Несколько реже применяются электродвигатели со смешанным возбуждением. Наконец, электродвигатели с независимым возбуждением в обычной практике не применяются.

Электродвигатели постоянного тока строятся на различные мощности, начиная от десятков ватт до тысяч киловатт.

При пуске в ход электродвигателя постоянного тока в цепь якоря приходится вначале включать добавочное сопротивление в виде пускового реостата, который по мере разгона двигателя постепенно выключается. При полном разгоне двигателя пусковой реостат совершенно выключается из цепи, т. е. сопротивление его доводят до нуля, и якорь оказывается присоединенным непосредственно к главным зажимам питающей цепи. При применении очень маломощных электродвигателей постоянного тока допускается включение их в цепь без всяких пусковых реостатов. Подобное непосредственное включение двигателей средних и больших мощностей недопустимо, так как сила тока в момент включения при отсутствии пускового реостата оказывается чрезмерно большой. Это может быть вредно как для самого двигателя, так и для питающей его цепи.

65. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В связи с тем что в современных условиях переменный ток играет основную роль при решении всякого рода задач в области электроэнергетического хозяйства, вопрос о пита-

нии электродвигателей непосредственно переменным же током имеет большое практическое значение.

В настоящее время существует большое количество разнообразных типов электродвигателей переменного тока. Само собой разумеется, что все они основаны на том или ином использовании механического взаимодействия проводников с током и внешнего магнитного потока, о чем мы уже говорили выше, в предыдущем параграфе, при рассмотрении электродвигателей постоянного тока. В основном электродвигатели переменного тока можно подразделить на три группы:

- а) синхронные двигатели;
- б) асинхронные двигатели (индукционные);
- в) коллекторные двигатели.

Синхронные¹ двигатели, по существу, решительно ничем не отличаются от обычных, синхронных же, генераторов переменного тока (см. § 55, фиг. 90—97). Из рассмотрения любой схемы генератора однофазного или трехфазного тока (например, фиг. 90 или 91) явствует, что если во время вращения этого генератора, оставляя неизменными условия возбуждения главного магнитного потока, пустить в armатуру данной машины от постороннего источника такой же переменный ток, какой она сама может генерировать, но только в обратном направлении, то машина начнет работать как двигатель и при этом будет продолжать вращаться в ту же сторону. Для этого необходимо только, чтобы ток от постороннего источника менял свое направление в такт с вращением двигателя, т. е. чтобы наибольшие значения силы тока достигались в моменты, когда отдельные секции armатуры синхронного двигателя находятся приблизительно против полюсов N или S . В таком случае двигатель будет стремиться вращаться с неизменной так называемой синхронной скоростью, строго соответствующей частоте питающего его однофазного или трехфазного тока и, следовательно, соответствующей скорости вращения генераторов, установленных на электрической станции. Как бы мы ни меняли (до известного, конечно, предела) нагрузку синхронного двигателя, остается неизменной скорость его вращения, т. е. его число оборотов в минуту. Это обстоятельство является в некоторых случаях весьма ценным свойством электродвигателя, и всегда, когда требуется более или менее строгое поддержание неизменной скорости его вращения, применяют именно синхронный двигатель, если только есть уверенность в

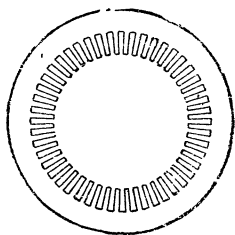
¹ Значение слова «синхронный» было разъяснено в § 56. Двигатель называется синхронным, когда скорость его вращения не является более или менее произвольной, но строго согласуется со скоростью вращения генератора переменного (в частности, трехфазного) тока, питающего данный электродвигатель.

том, что постоянство частоты переменного тока в питающей цепи поддерживается генераторной станцией достаточно удовлетворительно.

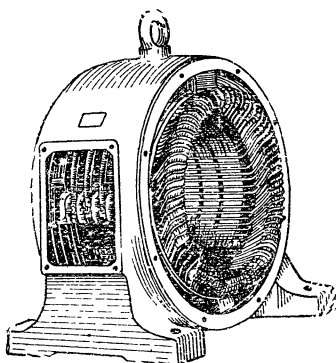
В случаях, когда нагрузка синхронного двигателя становится чрезмерно большой, т. е. превышает дозволенный предел, этот двигатель, как говорят, «выпадает из синхронизма» и совершенно останавливается. Дело в том, что слишком большая нагрузка может недопустимо сильно тормозить вращение его подвижной части, и благодаря этому взаимное расположение отдельных секций обмотки и полюсов, необходимое для правильной работы синхронного двигателя, перестанет повторяться в такт (синхронно) с изменениями силы переменного тока. Двигатель перестанет получать за счет энергии электрического тока вращающие усилия, направленные в одну и ту же сторону в течение полного периода. В одни моменты времени эти механические усилия будут действовать в одну сторону, в другие моменты — в противоположную сторону. Таким образом, как только двигатель выпадает из синхронизма, сразу же сильно уменьшается его мощность, и он просто останавливается под влиянием нагрузки.

Для пуска в ход синхронного двигателя необходимо его предварительно как-либо разогнать до скорости вращения, близкой к синхронизму, и только после этого надлежащим образом включенный в цепь двигатель впадает в синхронизм и начинает правильно работать. С целью предварительного разгона синхронного двигателя можно применить посторонний двигатель, например, двигатель постоянного тока, соединенный с валом синхронного. Если обстоятельства позволяют разгонять синхронный двигатель вхолостую, т. е. без нагрузки, то мощность двигателя постоянного тока не превышает $1/10$ мощности двигателя синхронного. По достижении надлежащей скорости вращения и после соответствующего включения синхронного двигателя в цепь переменного тока, вспомогательный пусковой двигатель при помощи особых механических приспособлений может быть совсем отключен от главного вала. Такой способ пуска в ход синхронных двигателей удорожает первоначальную стоимость всей установки и потому в последнее время почти совершенно оставлен. Когда мы имеем дело с синхронным двигателем трехфазного тока, то оказывается возможным воспользоваться для пуска в ход вращающимся магнитным полем (§ 53, гл. 4), создаваемым обмоткой, по которой пропускают трехфазный ток. Двигатели, основанные на применении вращающегося магнитного поля, принято называть асинхронными¹. Таким образом

¹ Приставка «а» по-гречески обозначает «не». «Асинхронный» значит «не синхронный», «не идущий в такт».



Фиг. 129. Заготовка из листового железа для статора асинхронного двигателя.



Фиг. 130. Статор асинхронного двигателя без якоря.

трехфазный синхронный двигатель пускают в ход как асинхронный, а затем, после разгона, надлежащим возбуждением электромагнитов двигателя от цепи постоянного тока заставляют машину впасть в синхронизм. Сущность устройства асинхронного двигателя мы сейчас и рассмотрим.

Как именно получается вращающееся магнитное поле, об этом мы уже говорили более или менее подробно в § 53. На фиг. 81 представлена в самом общем виде схема расположения полюсов, дающих вращающееся магнитное поле при возбуждении их трехфазным током. В данном случае эти полюсы образуются на концах ясно выраженных сердечников, равномерно расположенных по внутренней поверхности железного кольца (ярма), представляющего собой неподвижную часть асинхронного двигателя, его статор. Во избежание токов Фуко магнитную цепь статора обычно составляют из отдельных частей, выштампованных из надлежащего листового железа толщиной не более $\frac{1}{2}$ миллиметра. В настоящее время статоры асинхронных двигателей изготовляют почти исключительно с неясно выраженными полюсами, собирая в стопку некоторое количество выштампованных из листового железа колец, снабженных многочисленными зубцами с внутренней стороны (фиг. 129). При составлении в стопку подобных колец, изолируемых друг от друга, зубцы отдельных колец располагают одинаково так, чтобы образовались сплошные впадины в осевом направлении статора. В такие впадины и укладывают проводники обмоток трех секций, по одной на каждую фазу. При этом проводниками обычно заполняют все впадины. Торцовые соединения проводников, уложенных во впадины, отчетливо видны на фиг. 130, на которой изображен полностью собранный статор асинхронного двигателя. Итак, пропуская трехфазный ток

по обмотке подобного статора, мы получим во внутренней его полости вращающееся магнитное поле, которое в каждый момент времени направлено поперек оси статора от какой-либо группы зубцов к прямо противоположной группе.

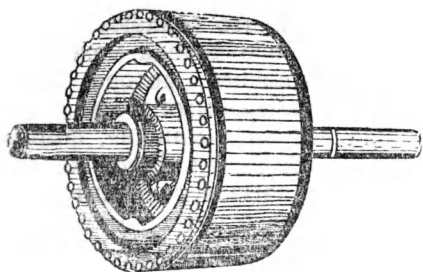
Если поместить внутрь статора сплошной металлический цилиндр, могущий вращаться вокруг оси, совпадающей с осью данного статора, то этот цилиндр увлекается вращающимся магнитным полем и стремится вращаться почти с той же скоростью, что и это поле. Это объясняется тем, что магнитный поток, пронизывающий металлический цилиндр, непрерывно вращаясь и меняя свое направление, будет все время пересекать отдельные участки металла, из которого сделан цилиндр. Благодаря этому в теле цилиндра будут индуцироваться токи, которые согласно закону Ленца (§ 46) будут механически взаимодействовать с возбуждившим их магнитным потоком, стремясь противодействовать перемещению (вращению) потока относительно цилиндра. И, так как поток все же непрерывно изменяет свое направление, вращаясь под влиянием возбуждающего его трехфазного тока, противодействие этому вращению со стороны цилиндра приводит к тому, что цилиндр стремится следовать за вращающимся магнитным полем и сам приходит во вращение. Если бы, однако, цилиндр стал вращаться с той же скоростью, что и магнитное поле, то исчезло бы какое бы то ни было изменение в расположении этого поля относительно цилиндра. В таком случае, исчезли бы и причины индуктирования токов в металле цилиндра и, следовательно, прекратилось бы механическое увлечение цилиндра вращающимся магнитным полем. Так как рассматриваемый металлический цилиндр, называемый ротором асинхронного двигателя, практически всегда должен совершать при своем вращении некоторую механическую работу, преодолевая хотя бы трение в подшипниках, поддерживающих его вал, то в действительности якорь всегда несколько отстает от вращающегося магнитного поля. Благодаря именно этому создаются условия для индуктирования в якоре токов большей или меньшей силы, в зависимости от нагрузки на валу двигателя. Таким образом описываемый двигатель всегда вращается со скоростью несколько меньшей, чем скорость вращения магнитного потока, т. е. вращается не вполне синхронно с потоком. Поэтому такой двигатель и называется асинхронным. Так как действие его основано, как мы видели, на непрерывном индуктировании токов в роторе, то иногда называют этот двигатель **и н д у к ц и о н н ы м**.

При общем рассмотрении устройства двигателей, основанных на применении вращающегося магнитного поля, мы сначала предположили, что ротор состоит из какого-либо металлического цилиндра. Если его сделать из сплошного же-

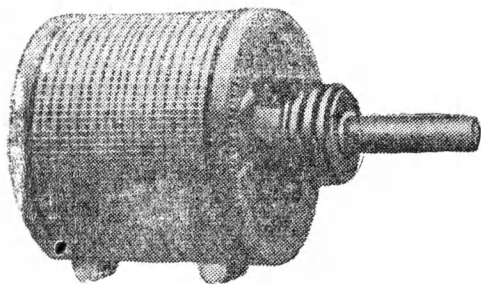
леза, то это выгодно в том отношении, что создаются хорошие условия для прохождения магнитного потока между полюсами статора. Однако, железо сплошного ротора будет чрезмерно сильно нагреваться от индуцируемых в них токов, и это вызывает слишком большие потери в машине, помимо других неудобств, связанных с пуском в ход. Если же сделать ротор сплошной медный, то это вызовет значительное увеличение магнитного сопротивления того пути, по которому проходит вращающийся поток, и, следовательно, ослабит его. Практически из этого положения выходят следующим образом. Основу ротора изготовляют из листового железа, собирая ее из выштампованных колец или кругов, насаживаемых стопкой на вал двигателя, причем размеры их подбирают таким образом, чтобы между наружной поверхностью железной основы ротора и внутренней поверхностью статора оставался лишь небольшой зазор. В таком роторе из пластинчатого железа могут возникать лишь очень слабые индуцированные токи, совершенно недостаточные для приведения его в движение под действием вращающегося магнитного потока. Чтобы создать условия для индуцирования в роторе токов достаточной силы, его железную основу снабжают зубцами и впадинами по внешней поверхности подобно тому, как это делается в зубчатых арматурах машин постоянного тока (см. § 54, фиг. 83), или просто проделывают каналы близ внешней поверхности в осевом направлении, а затем в эти впадины или каналы укладывают неизолированные или изолированные медные провода, образующие замкнутые цепи, по которым и проходят индуцируемые в них токи.

В асинхронных двигателях малых и средних мощностей (до 100 киловатт) в каналы или впадины помещают голые медные стержни, концы которых на торцах соединяются между собой медными же обручами. Эта обмотка внешне напоминает беличье колесо, и поэтому асинхронные двигатели с такой замкнутой накоротко обмоткой ротора иногда называют двигателями с беличьим колесом. На фиг. 131 отдельно изображен подобный ротор с короткозамкнутой обмоткой (беличьим колесом).

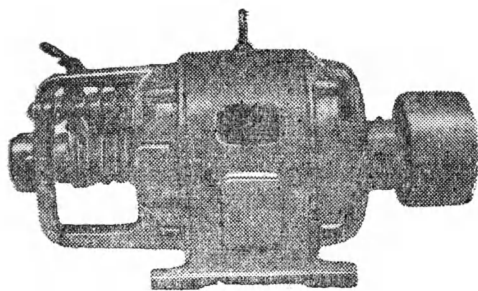
В случае сравнительно больших мощностей (свыше 100 киловатт) во впадины ротора асинхронного двигателя укладывается обмотка из изолированных медных проводов, которая состоит из трех отдельных секций по образцу трехфазной обмотки. Секции соединяются звездой, т. е. концы их соединяются вместе, начала же секций приключаются к трем контактным кольцам, укрепленным на валу ротора при посредстве изоляции. Такой ротор с контактными кольцами отдельно изображен на фиг. 132. В собранном асинхронном двигателе (фиг. 133) к контактным кольцам прижимаются



Фиг. 131. Короткозамкнутый ротор асинхронного двигателя (с беличьим колесом).



Фиг. 132. Ротор асинхронного двигателя с контактными кольцами.



Фиг. 133. Асинхронный двигатель с контактными кольцами (в собранном виде).

щетки, присоединяемые далее к пусковому реостату (обычно тройному). При включении обмотки статора в питающую цепь трехфазного тока пусковой реостат в цепи ротора сначала должен быть полностью включен. Этим достигается уменьшение силы идущего в статор трехфазного тока от внешней цепи, и вообще получаются более благоприятные условия пуска в ход двигателя, уже нагруженного. По мере разгона двигателя сопротивление реостата постепенно уменьшают и в конце концов этот реостат совершенно выключают, так что щетки оказываются соединенными накоротко, и двигатель продолжает работать с короткозамкнутым ротором.

При пуске в ход асинхронных двигателей, ротор которых уже изготовлен короткозамкнутым (беличье колесо), в случае более или менее значительных мощностей (свыше 5 киловатт) начальная сила тока, потребляемого от питающей трех-

фазной цепи, оказывается недопустимо большой, и для устранения этого применяют различные меры. Включают, например, непосредственно в главную цепь на время пуска в ход добавочные реостаты, ограничивающие силу тока. С той же целью можно при пуске в ход соединять статорную обмотку звездой, а при нормальной работе переключать на треуголь-

ник. Прибегают и к иным мерам для ограничения пускового тока в асинхронных двигателях. Вообще в этом отношении в настоящее время разработано много специальных приспособлений и схем, из которых мы назвали только главнейшие.

В дополнение к тому, что было раньше сказано о пуске синхронных двигателей в ход при помощи вращающегося магнитного поля, добавим следующее. Для улучшения условий асинхронного пуска в ход этих двигателей в полюсных башмаки их электромагнитов заделывают короткозамкнутые обмотки, которые играют ту же роль, что и короткозамкнутые обмотки роторов обычных асинхронных двигателей. При нормальной работе синхронного двигателя эти короткозамкнутые обмотки не имеют никакого значения, так как все время остаются в практически неизменном магнитном поле электромагнитов, возбуждаемых постоянным током. Применяют и несколько более сложные пусковые обмотки на полюсных башмаках синхронных двигателей, но суть дела от этого не изменится.

Рассматривая устройство асинхронных двигателей, мы исходили из основной схемы расположения полюсов статора, изображенной на фиг. 81. В этом случае мы имеем три пары полюсов, причем за время полного периода трехфазного тока вращающийся магнитный поток совершает один полный оборот. При обычной частоте в 50 герцев асинхронный двигатель с таким статором будет стремиться вращаться со скоростью, равной $50 \times 60 = 3\,000$ оборотов в минуту. Практически, благодаря указанному выше отставанию ротора от вращающегося магнитного потока, скорость вращения подобного двигателя при полной нагрузке будет несколько меньше, например, около 2 900 оборотов в минуту. Принято называть скольжением выраженное в процентах отставание ротора асинхронного двигателя от синхронной скорости, которая в данном случае равна 3 000 оборотов в минуту. Опыт показывает, что при полной нагрузке скольжение в асинхронном двигателе составляет примерно от 3 до 5%. Ясно, конечно, что при меньших нагрузках и скольжение будет соответственно меньше. При приближенном рассмотрении вопроса о скорости вращения асинхронных двигателей можно пренебречь скольжением, и в таком случае мы будем говорить о двигателе с тремя парами полюсов на статоре, что он обладает скоростью вращения около 3 000 оборотов в минуту. В ряде случаев такая скорость вращения чрезмерно велика. Для достижения меньшей скорости вращения увеличивают число пар полюсов на статоре, сохраняя вместе с тем порядок их чередования. Если взять вдвое больше полюсов, т. е. расположить на статоре шесть пар полюсов, то создаваемый ими магнитный поток будет совершать один полный оборот за

два периода переменного тока, и ротор будет вращаться со скоростью около 1 500 оборотов в минуту. Если применить на статоре девять пар полюсов, то магнитный поток будет совершать один полный оборот за три периода, и ротор будет делать около 1 000 оборотов в минуту и т. д. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым якорем на малые мощности (до 650 ватт) изготавливаются нашими электромашиностроительными заводами именно на 3 000 и 1 500 оборотов в минуту. Такие же двигатели большей мощности (до 100 киловатт) изготавливаются на 1 500, 1 000 и 750 оборотов в минуту. С контактными кольцами асинхронные двигатели изготавливаются на самые разнообразные мощности и скорости вращения. В случае очень больших мощностей, достигающих иногда до нескольких тысяч киловатт, двигатели с контактными кольцами, в связи с требованием сравнительной тихоходности, имеют обычно значительное число пар полюсов на статоре и обладают соответственно меньшими скоростями вращения (500, 375 оборотов в минуту и ниже).

При наличии значительного количества пар полюсов на статоре с неясно выраженными полюсами оказывается возможным, при помощи надлежащих переключений отдельных секций статорной обмотки, изменять в известных пределах число действующих пар полюсов и таким образом изменять ступенями скорость вращения асинхронного двигателя. В известных пределах можно кроме того, изменять величину скольжения и скорость вращения этих двигателей, регулируя сопротивление цепей ротора при помощи особых реостатов, подключаемых к контактным кольцам. Для достижения той же цели применяют еще и другие, более сложные способы. Все же задача плавного регулирования скорости вращения асинхронных двигателей не решается так просто и так выгодно в экономическом отношении, как в случае шунтовых электродвигателей постоянного тока, в которых сколь угодно плавное регулирование скорости достигается простым изменением силы тока, возбуждающего электромагнит. В связи со сказанным построение такого двигателя переменного тока, скорость вращения которого не была бы столь жестко связана с частотой тока, как это имеет место в синхронных и асинхронных двигателях, представляет значительный интерес в ряде практических приложений. Решением этой задачи является коллекторный двигатель переменного тока.

В первоначальном своем виде коллекторный двигатель переменного тока был совершенно подобен электродвигателю постоянного тока, по существу своему являющемуся коллекторной машиной. Мы знаем, что направление силы механического взаимодействия какого-либо проводника с током и

внешнего магнитного потока остается тем же самым, если и ток и магнитный поток одновременно изменяют свое направление на обратное (см. конец § 46, гл. 4). Следовательно, если, взяв двигатель постоянного тока, мы станем от одной и той же цепи переменного тока питать и электромагнит, и катушку, то направление возникающих механических сил, стремящихся вращать катушку, в основном останется неизменным. В справедливости этого положения можно проще всего убедиться, пользуясь правилом левой руки и рассматривая серийный двигатель с последовательным возбуждением электромагнита по схеме, изображенной на фиг. 87.

Ясно, конечно, что, во избежание токов Фуко в железе электромагнита, его необходимо собрать из отдельных частей, соответственным образом выштампованных из железных листов и изолированных одна от другой бумагой или лаком. Таким образом в коллекторных двигателях переменного тока все железные части, составляющие магнитную цепь, изготовляются из листового железа.

В зависимости от общих условий работы коллекторного двигателя его электромагнит (статор) выполняется как с явно выраженными полюсами, так и с неявно выраженными полюсами, подобно статору асинхронных двигателей.

Коллекторный двигатель переменного тока обладает рядом серьезных недостатков, если он представляет собой простое подражание двигателю постоянного тока. Между прочим коэффициент мощности оказывается чрезмерно малым. С целью устранения этих недостатков в современный коллекторный двигатель внесено немало разнообразных дополнений и видоизменений, сделавших его в конце концов весьма совершенным двигателем переменного тока, допускающим плавное регулирование скорости вращения.

В настоящее время существует большое количество специальных схем питания и регулирования коллекторных двигателей. По способу включения обмотки статора и по своим свойствам эти двигатели напоминают серийные, шунтовые и отчасти компаундные двигатели постоянного тока.

Рассмотренные коллекторные двигатели требуют для своего питания простого переменного тока и таким образом по существу являются однофазными коллекторными двигателями с двумя щетками на коллекторе. Включение таких двигателей в одну из фаз обычной трехфазной цепи может вызвать слишком большое неравенство нагрузок в отдельных фазах. В связи с этим значительный интерес представляют трехфазные коллекторные двигатели с тремя щетками на коллекторе и с трехфазной обмоткой на статоре, подобной обмотке асинхронных двигателей. Однако, сравнительно большая стоимость трехфазных коллек-

торных двигателей и затруднительность их постройки на большие мощности привели к тому, что их применяют чаще всего в соединении с асинхронными двигателями, для чего разработаны специальные схемы, позволяющие достигнуть полного использования мощности этих более дешевых двигателей при широком и плавном регулировании скорости вращения. Вообще предъявляемые к электродвигателям переменного тока требования в отношении плавного регулирования скорости вращения вызвали к жизни появление различных способов соединения между собой обмоток двух асинхронных двигателей или одного асинхронного, а другого коллекторного. При этом во многих случаях оба двигателя, соединяемые электрически, имеют общий вал.

66. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Возможность передавать электрическую энергию на большие расстояния от места расположения генераторных станций и широкое использование электродвигателей были причиной того большого переворота в промышленности, о котором мы говорили в предисловии. Работающий при самых разнообразных скоростях вращения, могущий во всех отношениях удовлетворить требованиям производства, приспособляемый без особых затруднений для каких угодно целей и не требующий постоянного надзора за собой, — электрический двигатель в современных условиях почти полностью вытеснил паровую машину и двигатель внутреннего сгорания во всех тех случаях, когда к станку или вообще к машине-орудию легко могут быть подведены провода, подающие электрическую энергию. В настоящее время трудно, и даже совершенно невозможно, представить себе какое-либо механическое производство, фабрику, завод, горнозаводское предприятие и т. п. без самого широкого использования тех возможностей, которые открываются благодаря целесообразному использованию электродвигателей. Все это, конечно, теснейшим образом связано с большими экономическими преимуществами, которые достигаются применением электрической энергии в области распределения движущих механизмов непосредственно по местам, где совершается та или иная работа.

В прежнее время, ввиду невозможности снабжать отдельной паровой машиной или двигателем внутреннего сгорания каждый станок, установленный в мастерской, обычно применялся почти исключительно так называемый групповой привод, который состоит в следующем. Вдоль ряда станков, специально для этого устанавливаемых в определенном порядке, располагается на некоторой достаточной высоте общий приводной вал. На этом валу закрепляется ряд шкивов,

по одному над каждым станком. Кроме того на конце вала ставится главный шкив, чаще всего соединяемый ремнем с общим для всех станков двигателем, который таким образом приводит во вращение вал. Отдельные станки приводятся в действие при помощи ременной передачи, соединяющей шкив станка с соответствующим ведущим шкивом, насаженным на общий приводной вал.

Первоначально электродвигатель просто ставили вместо теплового двигателя, оставляя в основном неизменной всю вышеописанную схему распределения энергии по отдельным местам ее потребления. Хотя групповой привод и до настоящего времени находит еще себе применение, однако, в промышленности все более и более проявляется стремление к переходу от группового привода к одиночному приводу, т. е. к снабжению каждого отдельного станка, каждой отдельной машины-орудия специальным электродвигателем, приводящим в движение только данный станок или данную машину-орудие. Это позволяет размещать рабочие машины как угодно, совершенно исключает потери энергии, связанные с устройством общего приводного вала, облегчает пуск в ход и регулирование скорости вращения отдельных рабочих машин и имеет еще ряд других немаловажных преимуществ. С усовершенствованием разного рода электродвигателей и по мере их удешевления одиночный привод становится все более и более целесообразным, групповой же привод еще сохраняет свое значение лишь в немногих случаях. Так как при одиночном приводе электродвигатель составляет как бы одно целое с соответствующей рабочей машиной и служит для приведения в движение только данной машины, то иногда строят совершенно особые электродвигатели, специально приспособленные для некоторого типа машин.

Движение рабочей машины бывает либо вращательное, либо прямолинейное. Последнее в свою очередь может быть либо поступательным, либо попеременно-возвратным. Соединение электродвигателей с рабочей машиной, имеющей вращательное движение, может быть либо непосредственное, при помощи так называемой муфты, механически связывающей вал электродвигателя с валом машины, либо через какую-либо механическую передачу: зубчатую, ременную, цепную и т. п. Преобразование вращательного движения электродвигателя в прямолинейное движение рабочей машины осуществляется при помощи разного рода передач. В этом случае могут быть применены зубчатка и рейка, гайка и винт, коромысло и шатун, барабан и канат и т. п. Некоторые современные рабочие машины имеют несколько электродвигателей для выполнения различных движений отдельных частей машины. Это упрощает конструкцию машины.

Кроме приведения в движение различных рабочих машин, электродвигатели в промышленности широко применяются и в разных вспомогательных обслуживающих механизмах. Так, одной из важных областей применения электрических двигателей являются краны и другие подъемные механизмы, представляющие собой необходимую часть оборудования всякого современного завода, фабрики, горнозаводского или металлургического предприятия и т. п. Вентиляторы и насосы, широко применяемые в заводских и промышленных установках, также обычно приводятся в действие электродвигателями.

В промышленности находят себе применение электродвигатели как переменного, так и постоянного тока. В тех случаях, когда на каком-либо предприятии имеется много асинхронных двигателей и в связи с этим коэффициент мощности в питающей цепи трехфазного тока оказывается чрезмерно низким, бывает целесообразно устанавливать там же и синхронный двигатель. Дело в том, что если такой двигатель перевозбудить, т. е. пропустить через обмотку его электромагнита несколько усиленный постоянный ток, то переменный ток, протекающий через статор, будет упреждать по фазе соответствующее напряжение. При этом все будет происходить так же, как если бы в цепь переменного (в данном случае трехфазного) тока были включены конденсаторы (§ 52, гл. 4). Таким образом перевозбужденный синхронный двигатель ведет себя в цепи переменного тока, как конденсатор, и поэтому его часто называют синхронным конденсатором. Подобно простым конденсаторам, синхронный конденсатор может скомпенсировать, т. е. уравновесить, вредное действие большой индуктивности асинхронных двигателей, работающих от той же цепи, и увеличить коэффициент мощности некоторой установки до наиболее выгодного предела, равного единице. Устанавливаемый для указанных целей синхронный двигатель нередко оставляют без нагрузки, и он вращается вхолостую. Дополнительные затраты на установку подобного двигателя-конденсатора легко окупаются улучшением коэффициента мощности и удешевлением стоимости киловаттчаса потребляемой энергии. Иногда синхронные конденсаторы ставят непосредственно на подстанции, питающей некоторый промышленный район.

67. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ТЯГА

Стремление использовать электрическую энергию для целей передвижения выявилось уже давно. Однако, вначале задача эта решалась путем применения гальванических элементов или аккумуляторов в качестве источников энергии; при этом элементы или аккумуляторы помещались в самом

передвигающемся экипаже, отягчая его и сильно ограничивая величину пробега, возможную без смены источников тока или без их подзарядки (в случае аккумуляторов). Затем были разработаны способы подачи тока в передвигающийся электродвигатель при помощи неподвижных голых проводов, которые чаще всего подвешиваются над путем пробега и от которых ток забирается особыми контактными приспособлениями, перемещающимися одновременно с электродвигателем. Это открыло широкие возможности в области электрической тяги благодаря тому, что оказалось доступным использование тока от мощных генераторных станций. Современное большое развитие электрической тяги главным образом основано именно на применении верхнего контактного провода. Другие же способы питания тяговых электродвигателей, хотя и применяются в ряде случаев, не получили еще особенно значительного общего распространения.

Электрическая тяга с питанием от верхнего провода приобрела наибольшее применение в различных видах железнодорожного транспорта¹. Наличие рельсового пути облегчает решение задачи о подводке тока, так как рельсы могут служить в качестве одного из проводов, причем собирание тока с рельсового пути осуществляется через металлические колеса подвижного состава. Само собой разумеется, что при использовании железнодорожного пути для проведения тока отдельные рельсы должны быть надежно соединены друг с другом в электрическом отношении. Наиболее совершенным способом устройства стыков является сварка рельсов.

По общему характеру электрические железные дороги могут быть:

а) городские, называемые трамваями² и метрополитенами³;

б) пригородные, местного значения;

в) междугородные, большого протяжения.

В электрической тяге на железных дорогах применяется как постоянный, так и переменный ток (однофазный или иногда трехфазный).

В современных условиях, при снабжении электрической железной дороги от центральной генераторной станции об-

¹ Латинское слово «транспорт» обозначает «переносу», «перевозу». Слово «транспорт» применяется для обозначения всякого рода перевозки.

² Слово «трамвай» — английского происхождения. «Трам» обозначает «плоский рельс», слово же «вай» (по-английски произносится «вэй») обозначает «дорога», «путь».

³ Греческое слово «метрополис» обозначает «главный город». Французское слово «метрополитэн» (столичный) в настоящее время обычно применяется в качестве названия городской железной дороги (чаще всего подземной), которая служит для движения с большой скоростью в районе большого города.

щего пользования, постоянный ток обычно получается путем преобразования трехфазного тока на специальных тяговых подстанциях с помощью двигателей-генераторов или однофазных преобразователей или же, наконец, с помощью ртутных выпрямителей (§ 60, гл. 6). Непосредственное питание контактного провода от станций постоянного тока встречается сравнительно редко лишь в городских трамвайных установках и преимущественно в старых. Что касается напряжения, при котором подается постоянный ток на линию, то для городских железных дорог применяется 500 и 750 вольт, для дорог пригородных и местных напряжение доходит до 1 500 вольт и, наконец, для междугородных дорог — до 3 000 вольт и выше. Выбор напряжения определяется величиной потребляемой мощности и требованием, чтобы падение напряжения в линии не было чрезмерно велико.

В трамваях, метрополитенах и на пригородных железных дорогах электродвигателями принято оборудовать вагон, служащий и для размещения пассажиров. Такой моторный³ вагон обычно бывает первым, ведущим в составе нескольких вагонов. Простые пассажирские вагоны, следующие за моторным, называются прицепными. При трамвайном движении иногда идет один моторный вагон без прицепных. В поездах пригородных железных дорог, кроме головного моторного вагона, в некоторых случаях располагают второй моторный вагон в середине состава. Поезда междугородных железных дорог в огромном большинстве случаев приводятся в движение специальным электровозом, играющим ту же роль, что и обычный паровоз. Электровоз целиком и полностью служит для размещения движущих механизмов и всех вспомогательных устройств, необходимых для управления электродвигателями.

Системы переменного тока применяются главным образом для междугородных железных дорог. При этом наиболее распространены системы однофазного тока с коллекторным двигателем. В связи с затруднениями, которые встречаются при коммутации однофазных коллекторных двигателей, применяемая на дорогах частота тока обычно берется пониженная, от 15 до 25 герцев. Ввиду этого для железных дорог, работающих по описываемой системе, приходится либо иметь специальные электрические станции с однофазными генераторами, либо на ряде подстанций с установленными там двигателями-генераторами преобразовывать трехфазный ток с частотой в 50 герцев в ток однофазный пониженной частоты. В контактный провод посылается переменный ток при напряжении до

³ Слово «мотор» — латинского происхождения и обозначает «двигатель». «Моторный вагон» — «двигательный вагон».

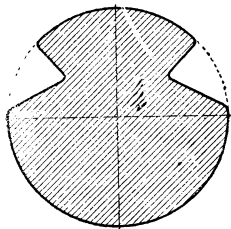
15 000 вольт, которое трансформируется в электровозах на 200—500 вольт. Однофазный ток такого пониженного напряжения и поступает затем в коллекторные двигатели. Возможность питать контактный провод при более или менее высоком напряжении (до 15 000 вольт) является главнейшим преимуществом системы однофазного переменного тока по сравнению с постоянным током, так как это допускает большие расстояния между подстанциями и, следовательно, позволяет ограничиваться сравнительно малым числом подстанций.

Применение трехфазного тока для непосредственного питания двигателей электровоза встречается реже, хотя и допускает использование асинхронных двигателей, более надежных и дешевых, чем коллекторные. Основным неудобством, с которым сопряжена эта система, является необходимость выполнять рабочую сеть с двумя контактными проводами вместо одного (третьим проводом служит, конечно, рельсовый путь).

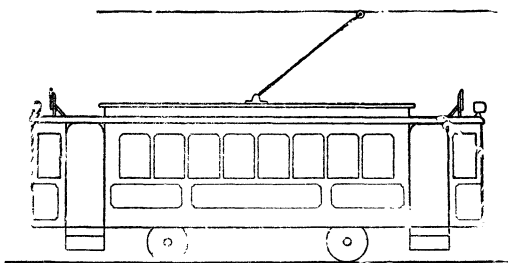
Вследствие большей надежности в работе трехфазных асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока по сравнению с однофазными коллекторными двигателями, в СССР и в других странах ведутся исследования, направленные к тому, чтобы совместить преимущества однофазного тока при питании контактного провода с преимуществами трехфазных асинхронных двигателей и двигателей постоянного тока. Для достижения этой цели возможно либо преобразовать внутри электровоза однофазный ток в трехфазный, либо выпрямлять внутри электровоза же однофазный ток при помощи ртутных или каких-либо иных выпрямителей, предварительно понизив напряжение трансформатором. Надо полагать, что в ближайшие годы техника электрической тяги на больших железных дорогах обогатится новыми опытными данными.

Существует несколько различных способов передачи вращения от вала электродвигателя к так называемым сцепным осям, т. е. к осям, на которых сидят главные колеса электровоза или моторного вагона и которые весом опирающегося на них подвижного устройства прижимаются к рельсам и таким образом сцепляются с ними. В огромном большинстве случаев эта передача осуществляется при посредстве зубчатых зацеплений, позволяющих применять сравнительно быстроходные электродвигатели. Число электродвигателей, устанавливаемых на каждом отдельном электровозе или моторном вагоне, обычно бывает не меньше двух, но нередко применяются четыре и более электродвигателей.

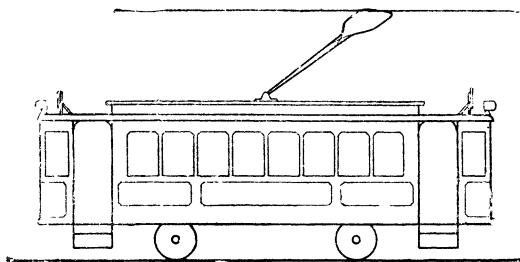
Что касается подробностей контактных и токособирающих устройств, применяемых на электрических железных дорогах, то в этом отношении можно указать следующее. Верхний



Фиг. 134. Поперечный разрез контактного провода.



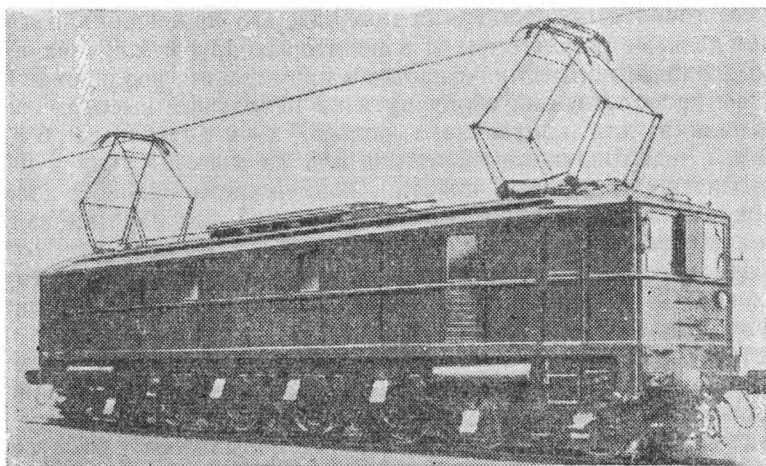
Фиг. 135. Трамвайный вагон с роликовым токоприемником.



Фиг. 136. Трамвайный вагон с дуговым токоприемником.

контактный провод изготавливается из твердотянутой меди или из медных сплавов (бронза). Для облегчения захвата контактного провода специальными поддерживающими зажимами провод этот снабжается в верхней части особыми впадинами, показан-

ными на фиг. 134, изображающей поперечное сечение провода. Металлические зажимы, поддерживающие контактный провод, прикрепляются к разного рода подвесным приспособлениям. Для этой цели могут служить поперечины установленных вдоль полотна железной дороги столбов (деревянных, железных или железобетонных) или подвесные проволоки, концы которых закрепляются на столбах, а также на каких-либо иных опорах (при устройстве трамваев часто используются для этой цели стены зданий). Во всех случаях в состав подвесного устройства входят соответствующие изоляторы, обеспечивающие достаточную изоляцию контактного провода. Для собирания тока с контактного провода на электровазе или на крыше моторного вагона устанавливается токоприемник, представляющий собой легко поднимающееся и опускающееся устройство, снабженное контактной частью. На электрических трамваях первоначально употреблялся исключительно роликовый токоприемник (фиг. 135), состоящий из сравнительно тонкой стальной трубы длиной в 3—4 метра, расположенной наклонно и снабженной на конце металлическим желобчатым роликом, обычно называемым



Фиг. 137. Электровоз (с двумя токоприемниками).

троллеем¹. Стальная труба может поворачиваться около своей нижней точки и при помощи особых пружин подтягивается кверху, прижимая ролик к контактному проводу, входящему в желоб. В настоящее время получил большое распространение дуговой токоприемник (фиг. 136), состоящий из легкой металлической рамы, устанавливаемой, как и описанная выше стальная труба, и поддерживающей в верхней своей части дугообразную накладку, изготовляемую обычно из сплава алюминия с небольшим количеством меди. Эта контактная дуга располагается в поперечном направлении по отношению к верхнему проводу и при движении трется об этот провод, обеспечивая таким путем надежное электрическое соединение. На электровозах и в тяжелых моторных вагонах пригородных железных дорог применяют более сложные устройства для прижимания токоприемной дуги к контактному проводу. При этом обычно применяют не один, а два токоприемника, работающих параллельно, во избежание прерыва тока вследствие случайного повреждения одного из токоприемников. Такие сложные токоприемные приспособления показаны на фиг. 137, изображающей общий вид современного электровоза. Во всяком случае токоприемник всегда должен упруго прижиматься к контактному проводу для того, чтобы токоснимание не нарушалось вследствие недоста-

¹ Английское слово «троллей» обозначает именно «ролик». В связи с этим в Америке троллеем обычно сокращенно называют электрический трамвай с троллейным токоприемником.

точно точного подвешивания провода, его провисания и т. п. Иногда в метрополитенах и в некоторых других случаях вместо верхнего контактного провода применяется изолированный рельс, располагаемый сбоку пути на небольшой высоте. Ток приемники для контактного рельса, контактные башмаки, изготавливаются из чугуна или из мягкой стали в виде сравнительно тяжелых пластин, надлежащим образом изолированных и достаточно сильно прижимаемых пружинами к изолированному рельсу.

На хороших асфальтированных или шоссированных дорогах возможно сооружение безрельсовой электрической линии. Приводимый в движение электродвигателями автобус¹ питается током от двух контактных проводов, подвешиваемых над улицей или дорогой, причем два тождественных токоприемника снабжаются желобчатыми роликами, по одному на каждый провод. Такого рода автобус называется троллейбусом². При достаточной длине и подвижности токоприемников троллейбус, как показывает опыт, может во время своего хода довольно свободно отклоняться вправо и влево, что значительно облегчает уличное движение.

Что касается электрической тяги с аккумуляторами, то в некоторых случаях она имеет значение и в современных условиях. Например, аккумуляторная тяга целесообразна при обслуживании промышленных предприятий, в которых по условиям безопасности и по техническим причинам применение паровой тяги или электрической тяги с контактным проводом недопустимо (некоторые рудники, фабрики и склады взрывчатых веществ и т. п.). Кроме того аккумуляторная тяга иногда находит себе применение и в других случаях при обслуживании подъездных путей фабрично-заводских предприятий, мастерских, фабрик и заводов, вокзальных помещений и т. п. Наконец, при надлежащей организации зарядки и смены тяговых аккумуляторов такой способ электрической тяги в ряде случаев становится экономически допустимым в области городского автомобильного движения — грузового и легкового. До сих пор, однако, аккумуляторная тяга не получила более или менее широкого применения в этой области.

В горном деле электрическая тяга получила большое распространение при откатке, т. е. при передвижении в подземных выработках тележек с полезными ископаемыми (руда, ка-

¹ По-латыни «омнибус» значит «для всех». Так обычно называется большой экипаж общественного пользования, предназначенный для более или менее значительного количества пассажиров. В Америке и Англии вошло в употребление сокращенное наименование «бус». Приставка «авто» — греческого происхождения и обозначает «сам собой» (подразумевается — «движущийся»).

² «Тролейбус» значит: автобус с троллейными токоприемниками.

менный уголь и т. п.) от места добычи к подъемным машинам или на поверхность земли. Помимо аккумуляторных электровозов, в тех случаях, когда рудник безопасен в отношении взрыва газа, применяются и электровозы, питаемые от верхнего контактного провода. На тех участках подземных выработок, где нет контактного провода, электровоз питают посредством гибкого кабеля, сматываемого и наматываемого при движении электровоза на специальный барабан. Для электрической откатки обычно применяют особые небольшие электровозы соответственно малой мощности. Наконец, электрическая откатка может осуществляться при помощи каната, тянущего тележки и наматываемого на неподвижный барабан, который приводится во вращение электродвигателем. Это тоже представляет собой некоторую разновидность электрической тяги.

Сказанное выше далеко не исчерпывает всех областей применения электродвигателей для целей передвижения. Упомянем еще об электродвижении судов, гребные винты которых приводятся во вращение электрическими двигателями, питаемыми током от генераторов, установленных на самом судне вместе с тепловыми первичными двигателями (паровыми машинами или дизелями). На первый взгляд может показаться нецелесообразным применение промежуточного электрического устройства при наличии на судне тепловых двигателей, которыми можно непосредственно приводить во вращение вал гребного винта. Однако, такого рода электродвижение судов в ряде случаев представляет известные преимущества благодаря возможности использовать сравнительно быстроходные и соответственно более легкие тепловые двигатели, а также благодаря достигаемой при этом возможности весьма просто регулировать гребные электродвигатели и изменять направление их вращения (передний и задний ход), не прибегая к непосредственному воздействию на первичные двигатели (тепловые машины). Аккумуляторы применяются для питания гребных электродвигателей в основном только в практике подводных лодок, а также небольших пассажирских катеров и шлюпок. При электродвижении судов на каналах наиболее распространено применение небольшого электровоза, питаемого от верхнего провода и идущего по рельсам вдоль бечевника. При помощи каната этот электровоз тянет баржи.

Наконец, в заключение параграфа, посвященного электрической тяге, скажем несколько слов об электропахоте. В настоящее время этот способ обработки почвы еще не получил широкого распространения, но в некоторых специальных случаях электродвижение плуга уже теперь может быть признано более или менее оправдывающим себя в экономическом отношении. Электропахота производится главным образом двумя

способами. В электротракторах плуг и двигатель соединены в одном устройстве. Ток подводится к двигателю посредством гибкого кабеля, сматываемого с барабана или наматываемого на него. В электролебедочной системе плуг отделен от электротягового устройства, состоящего из лебедки, устанавливаемой неподвижно вместе с электродвигателем, вращающим барабан лебедки. От нее движение передается плугу тянущим стальным канатом, который наматывается на барабан. По мере прохождения борозд лебедка переставляется с места на место.

68. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЗДАНИЙ И В ДОМАШНЕМ БЫТУ

Из предыдущих параграфов мы видели, насколько широко развиты в настоящее время всевозможные применения электрической энергии для получения движущей силы в различных отраслях промышленности и в области транспорта. Само собой разумеется, что электродвигатели могут иметь немалое значение и при обслуживании зданий, а также в домашнем быту. В этом отношении мы встречаемся с большим числом уже совершенно определенных применений электродвигателя.

В общественных зданиях и в жилых домах с большим числом этажей наряду с лестницами принято устраивать специальные подъемники для облегчения посетителям и жильцам достижения необходимого этажа. Эти подъемники обычно называются лифтами¹. Они в основном состоят из кабины, поднимающейся до любого этажа при посредстве стального каната, наматываемого на барабан, который вращается от электродвигателя. Все управление электродвигателем лифта — пуск в ход и остановка в момент достижения необходимого этажа — производится из кабины путем поворота ручки или простым нажатием кнопок. Кроме лифтов, служащих для подъема людей, в зданиях иногда устанавливают служебные лифты для подъема тяжестей (топлива и т. п.). В жилых домах с кооперативными кухнями и столовыми иногда устраивают еще малые вспомогательные подъемники для подачи пищи в отдельные квартиры из первого этажа, где располагается общая кухня. Такого рода подъемники имеют выходы в виде небольших дверей в стене каждой квартиры.

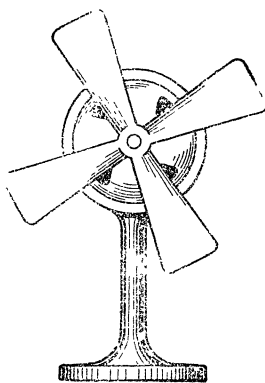
Электродвигатели применяются также при устройстве водоснабжения высоких зданий, в верхние этажи которых вода не доходит ввиду недостаточности напора, поддерживаемого в водопроводных трубах. В этих случаях оказывается необходимым устанавливать дополнительные насосы, обычно

¹ Английское слово «лифт» именно значит «подъемная машина».

приводимые в действие электродвигателями. Такого рода меры приходится принимать, например, в американских зданиях, доходящих до 100 этажей. Но и в домах в 10—15 этажей встречается иногда надобность в электрических насосах для обеспечения бесперебойности водоснабжения.

Наконец, вентиляция зданий является весьма значительной областью применения электродвигателей. Мощные электрические вентиляторы служат для снабжения свежим воздухом различных помещений через вентиляционные каналы, устраиваемые в стенах зданий. Иногда, наоборот, через эти каналы вытягивают воздух из помещений. Небольшие вентиляторы, вытягивающие воздух из рабочих помещений, располагают в окнах или у особых вытяжек в стенах. К области вентиляции зданий относится и так называемое кондиционирование¹ воздуха, заключающееся в том, что в помещение подводится воздух, предварительно очищенный от пыли, надлежащим образом увлажненный и кроме того подогретый (зимой) или охлажденный (летом). Благодаря всем этим мерам в помещениях создаются постоянные условия, наиболее благоприятные в данном случае и не зависящие от условий погоды, внешней температуры и т. п. Очистка воздуха, контроль над степенью его влажности и над его температурой производятся при кондиционировании воздуха вполне автоматически, с помощью особых приборов, действующих через реле на ряд электродвигателей, приводящих в движение как вентиляторы, так и другие механизмы, необходимые в этом более или менее сложном устройстве.

Итак, мы видим, что электродвигатели находят себе довольно значительное применение при общем обслуживании зданий. Кроме того мелкие электродвигатели могут быть широко использованы в домашнем быту для самых разнообразных целей. На фиг. 138 изображен, например, настольный вентилятор, составляющий одно целое с малым электродвигателем, установленным на стойке. Еще меньших размеров электрический вентилятор, соединенный с электрической же грелкой, позволяет получить струю теплого сухого воздуха для просушки волос после мытья, а также рук и лица. Такая



Фиг. 138. Малый настольный вентилятор.

¹ Латинское слово «кондицио» обозначает «состояние», «условие». Слово «кондиционирование» применяется в смысле «поддержание определенного состояния».

сушилка, обычно называемая феном¹, в полной мере может заменить полотенце и начинает входить в употребление. Все больше и больше распространяются электрические пылесосы. В них особая щетка или иное устройство, играющее роль щетки, непосредственно присоединяется к гибкой трубке, на другом конце которой находится переносный отсасывающий насос, приводимый в действие электродвигателем. Далее, воздух с пылью поступает в мешок из материи, задерживающей пыль и пропускающий воздух наружу. Таким образом при уборке комнат чрезвычайно облегчается собирание пыли без распространения ее в воздухе и без вредного засорения пылью дыхательных путей лиц, убирающих помещение. Небольшие электродвигатели с успехом применяются для вращения швейных машин, мясорубок и т. п. Существуют даже электрические бритвы, снабженные очень маленьким двигателем, приводящим в быстрое попеременное движение лезвие особой формы. Вообще использование мелких электродвигателей в домашнем быту начинает приобретать все большее и большее значение и, несомненно, может сильно способствовать улучшению условий труда и быта.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАГРЕВАНИЕ, ЭЛЕКТРОСВАРКА, ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ И В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ПРОЧИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

69. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАГРЕВАНИЕ

Если в обычной электрической цепи не работают электродвигатели, не производится электрохимическая работа и вообще не происходит никаких явлений, связанных с превращением энергии тока в другие виды энергии, отличающиеся от тепловой, то вся электрическая энергия, расходуемая в данной цепи, полностью превращается в тепло. Количество образовавшегося в этих случаях тепла можно, следовательно, измерять количеством электрической энергии, за счет которой возникло это тепло.

Так как в целом ряде отраслей промышленности надлежащий нагрев обрабатываемых материалов имеет большое значение в ходе производственного процесса, то само собой разумеется, что тепловые действия тока нашли себе многочисленные практические приложения. С наиболее общим случаем электрического нагревания мы встречаемся при прохождении

¹ В Швейцарии «феном» называется теплый сухой ветер.

тока через твердые и жидкие проводники, когда образуется так называемое джоулево тепло (см. § 42, гл. 4). Это тепло широко используется в различных электронагревательных приборах. Более сложную обстановку мы имеем при горении вольтовой дуги (§ 44, гл. 4), когда тепловые действия тока сопровождаются очень значительными местными повышениями температуры, что также используется в некоторых производственных процессах. В следующих параграфах мы коснемся такого рода практических приложений вольтовой дуги, здесь же остановимся на простейших электронагревательных устройствах, основанных на выделении тепла электрическим током, проходящим по твердым проводникам. Эти устройства, так называемые печи сопротивления, получили распространение в некоторых производствах и в лабораторной практике, а также в домашнем быту.

Преимущества электрического нагревания печами сопротивления весьма значительны по сравнению с нагреванием теплою горения. Такое электрическое нагревание позволяет легко и удобно регулировать температуру простым изменением силы тока, достигая в случае надобности весьма высоких температур. Вместе с тем, при полном отсутствии дыма, вредных газов и золы, при наименьшей пожарной опасности, имеется возможность как угодно дробить и распределять места образования тепла. Наконец, электрическое нагревание допускает весьма совершенное использование тепла, так как электронагревательные устройства обладают большим коэффициентом полезного действия. Единственный упрек, который можно сделать по поводу электрического нагревания, — это относительная дороговизна тепла, получаемого за счет электрической энергии. Во многих случаях, однако, этот недостаток покрывается указанными выше преимуществами, в особенности высоким коэффициентом полезного действия.

В каждом электронагревательном устройстве с сопротивлением наиболее существенную часть составляет тот проводник, в котором выделяется тепло при прохождении тока. Обычно, в случаях, когда не требуется температура выше 1100°C , в качестве проводника применяют проволоку из нихрома, представляющего собой в достаточной степени стойкий сплав никеля, хрома и железа. Проволоки из такого материала обладают сравнительно большим сопротивлением, что имеет известное значение, так как это дает значительную экономию места при укладке нагревательной проволоки в различных приборах и устройствах. Следовательно, применяя нихром, мы можем в более или менее незначительном объеме надлежащим образом свернуть и уложить проволоку, обладающую сопротивлением, которое достаточно для поглощения заданной электрической мощности. Обычно нихромовую проволоку на-

вивают, избегая соприкосновения отдельных витков, на основу из какого-либо жаростойкого материала, например из слюды, фарфора, кварца, огнеупорной глины и т. п. Иногда свивают проволоку в спираль, которую затем укладывают во впадину или желоб на поверхности основы из огнеупорной глины, придавая этой основе ту или иную форму, в зависимости от назначения электронагревательного прибора. Для достижения наилучших условий использования тепла, выделяемого накаливаемой проволокой, и направления его в необходимое место, применяют кроме того различные теплоизолирующие материалы, как-то: асбест, слюдяную муку и т. п. В случаях незначительного нагрева в качестве теплоизолирующих материалов допускаются войлок, опилки, пробка и т. д.

Когда требуется температура более высокая, чем та, которой можно достигнуть с проволокой из нихрома, применяют другие материалы. Платиновая проволока или лента позволяют достигнуть температуры около $1\,300^{\circ}\text{C}$, вольфрамовая проволока—до $2\,200^{\circ}\text{C}$ и, наконец, угольно-графитовые стержни и зерна—до $2\,500^{\circ}\text{C}$. При применении проводников вольфрамовых или угольно-графитовых приходится считаться с окислительным действием кислорода воздуха и помещать эти накаливаемые проводники в пространство, в котором нет кислорода. Нередко электрические печи, предназначенные для достижения очень высоких температур, устраивают таким образом, что все накаливаемые части заключаются в пространство, из которого выкачан воздух. Подобные печи называют пустотными, или вакуумными.

Форма и размеры основной электронагревательной части бывают весьма разнообразны и всецело зависят от назначения. Например, применяемые в лабораториях электрические печи сопротивления весьма часто представляют собой трубку диаметром от 5 до 10 сантиметров, изготовленную из огнеупорного материала и обмотанную снаружи соответствующей проволокой. Все это окружено теплоизолирующим слоем (асбеста и т. п.) и помещено в железный кожух. С концов трубка закрывается дверцами из огнеупорного же материала. Внутрь трубки помещают разогреваемый предмет. Иногда для лабораторных плавок обматывают проволокой тигель больших или меньших размеров и затем покрывают его снаружи тепловой изоляцией. Подобного же рода различные электрические печи применяют и в промышленности, главным образом для плавки цветных металлов, для тепловой обработки стали, для обжига фарфоровых и глиняных изделий, для сушки и т. п. На фиг. 139 изображен разрез электрической печи сопротивления, применяемой для плавки меди и бронзы. Она устроена несколько иначе. В качестве нагреваемого проводника здесь служат угольные стержни $У$, тепло от которых излучается

частью непосредственно на расплавляемый металл *М*, частью отражается сверху от свода печи.

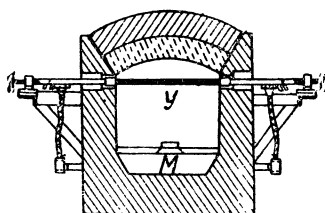
Кроме описанных устройств применяются электронагреватели других видов для самых разнообразных целей. Между прочим существуют электрические водонагреватели, присоединяемые непосредственно к водопроводной трубе. В некоторых производствах применяются электрические котлы и т. п.

В домашнем быту электронагревательные приборы также получили широкое распространение. Для варки пищи пользуются либо одиночными круглыми плитками, либо более сложными электрическими кухонными печами, включающими в себе 2—3 плитки и духовку. Такая электрическая печь для кухни изображена на фиг. 140. Одельные плитки обычно потребляют от 400 ваттов до 2 киловаттов, кухонные печи — от 1 до 3 киловаттов. Иногда изготовляют отдельные духовки, потребляющие до 1 киловатта. Весьма распространены также электрические кастрюли и чайники, потребляющие около 500 ваттов и выше в зависимости от емкости. Применяются и другие нагреватели для разных целей.

Большое распространение в домашнем быту получили электрические утюги. В зависимости от размеров они потребляют от 250 до 500 ваттов. Для прачечных и пошивочных мастерских применяются большие утюги, потребляющие до 800 ваттов.

Электрические кухонные печи большой мощности (от 10 до 20 киловаттов) начинают применяться для варки пищи в ресторанах, общественных столовых и т. п.

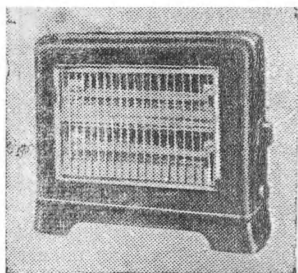
По мере развития электроэнергетического хозяйства и удешевления электрической энергии встает вопрос об электрическом отоплении помещений. В настоящих условиях лишь в редких случаях этот вид отопления может быть признан более или менее целесообразным, как совершенно самостоятельный



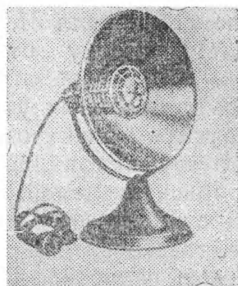
Фиг. 139. Электрическая печь сопротивления (для плавки металла).



Фиг. 140. Электрическая печь для кухни.



Фиг. 141. Электрическая
печь для комнатного
отопления.



Фиг. 142. Электрическая
отражательная печь-
прожектор.

способ обогрева помещений. Однако, уже теперь получили распространение разного рода электронагревательные устройства, служащие в виде дополнения к другому — основному — способу, отопления (центральному или печному). На фиг. 141 изображена электрическая печька, предназначенная для общего подогревания помещения. В случаях, когда желательно направить излучение тепла в определенную сторону, применяют отражательную печьку—прожектор (фиг. 142), состоящую из вогнутого металлического зеркала, внутри которого располагается на огнеупорную основу спираль из нихромовой проволоки, накаливаемая до красного каления. Печки эти можно использовать в каждом помещении, куда подана электрическая энергия.

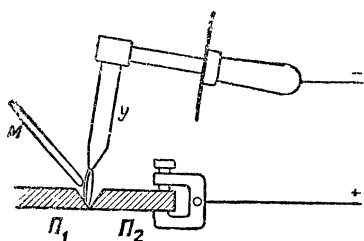
70. ЭЛЕКТРОСВАРКА

Сварка металлов вообще является одним из очень распространенных способов соединения отдельных частей различных металлических изделий и металлических сооружений. Для производства сварки требуется значительный нагрев металла в месте соединения. В этом отношении применение электрической энергии оказывается весьма целесообразным.

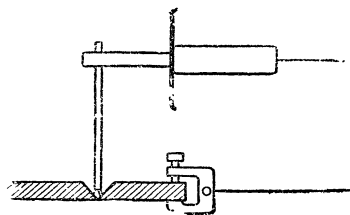
В настоящее время широкое распространение получили два вида электрической сварки: дуговая электросварка и контактная электросварка.

При дуговой электросварке используется сильный местный нагрев в вольтовой дуге. По способу Бенардоса¹ сварка производится следующим образом (фиг. 143). Положи-

¹ Русский изобретатель Бенардос разработал свой способ электросварки в 80-х годах прошлого столетия. Впервые изобретение Бенардоса было применено в мастерских Орловско-Витебской железной дороги.



Фиг. 143. Электросварка по способу Бенардоса.



Фиг. 144. Электросварка по способу Славянова.

тельный полюс источника постоянного тока присоединяется к свариваемым предметам $П_1$ и $П_2$, а отрицательный — к угольному электроду $У$. Вольтова дуга, образуемая между этими электродами, расплавляет кромки соединяемых частей и тем сваривает их. При большой их толщине добавляется металл расплавлением в дуге стержня $М$ или кусков того же состава, что и свариваемое изделие. Регулировка длины дуги производится вручную или при помощи автоматического приспособления. Для уменьшения науглероживания металла, например, железа, иногда заменяют угольный электрод графитовым.

Способ Славянова¹ отличается от предыдущего тем, что угольный электрод заменяется металлическим стержнем, который, расплавляясь, заполняет шов (фиг. 144). В зависимости от условий работы верхний электрод-стержень присоединяется либо к отрицательному, либо к положительному полюсу источника постоянного тока. Применяется также и переменный ток при условии употребления стержневого электрода, покрытого специальной обмазкой. Однако постоянный ток дает более надежную сварку, и потому чаще всего он именно и применяется. Во всех вообще случаях надлежащая обмазка стержня улучшает качество сварки. Способ Славянова имеет наибольшее распространение.

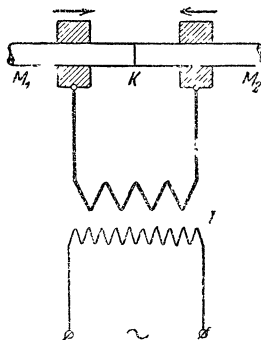
Техника дуговой электросварки в настоящее время очень хорошо разработана. Такого рода сварка теперь широко применяется в промышленности и в строительном деле, так как сваренные швы обладают высокими качествами и, что особенно важно, большой прочностью. Сваривают листовое и угловое железо, железные балки и плиты, всевозможные стальные и чугунные части, а также цветные металлы (медь и ее сплавы). В виде примера можно указать, что в современном электромашиностроении при производстве генераторов, даже

¹ Инженер Н. Г. Славянов (1854—1897) — русский металлург, положил начало тщательному изучению процесса электросварки с точки зрения свойств металла в сварном шве. Первый патент по электросварке взял в 1890 г.

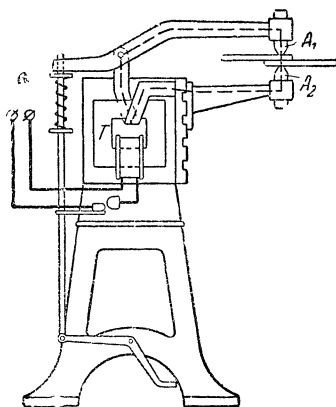
самых больших, почти все тяжелые массивные части машин изготавливаются из свариваемых вольтовой дугой отдельных кусков, соответственным образом вырезанных из толстых железных или стальных плит и предварительно изогнутых в зависимости от формы окончательного изделия. Железные опоры для линий передач (фиг. 104—105) также обычно составляют из отдельных кусков углового и коробчатого железа, свариваемых дугой. При сооружении мостов и металлических остовов высоких зданий начинает входить в употребление дуговая сварка составных частей. Сварка дугой применяется в судостроении при соединении отдельных железных листов, из которых составляется корпус судна. Пользуясь электросваркой, изготавливают всевозможные железные резервуары и т. д. Трудно себе представить какую-либо область машиностроения и строительного дела, где электросварка не могла бы найти применения, упрощая, облегчая и удешевляя производственные процессы.

В особо ответственных случаях применяют так называемую атомно-водородную сварку, состоящую в следующем. Струя водорода продувается сквозь вольтову дугу, образованную между электродами из вольфрама. В подобных условиях частицы водорода распадаются на атомы, поглощая при этом тепло. По выходе из дуги атомы вновь соединяются в частицы, выделяя обратно большое количество тепла, и образуют сварочное пламя с температурой от 4 000 до 4 500° С. Здесь вольтова дуга используется не непосредственно.

При контактной электросварке используется джоулево тепло, образующееся в месте стыка свариваемых металлических частей, через которые пропускают сильный электрический ток. В стыке получается контакт, замыкающий сварочную цепь. Сопrotивление этого контакта обычно велико по сравнению с прочими частями цепи, и потому джоулево тепло выделяется главным образом в месте контакта. При достаточной силе тока количество выделяющегося в этом месте тепла бывает настолько велико, что достигается температура плавления металла, и тогда некоторым нажатием мы легко достигаем надежного сваривания данных двух частей. В качестве источника тока при контактной электросварке применяется трансформатор переменного тока, имеющий вторичную обмотку, состоящую из небольшого количества витков очень толстого медного провода. На фиг. 145 изображена схема включения подобного сварочного трансформатора. Здесь T — трансформатор, M_1 и M_2 — свариваемые металлические части, K — место контакта между ними. Концы толстой обмотки трансформатора присоединяются к массивным обоямам, в которые зажимаются свариваемые части. Стрелками показано направление механического нажатия.



Фиг. 145. Общая схема контактной сварки.



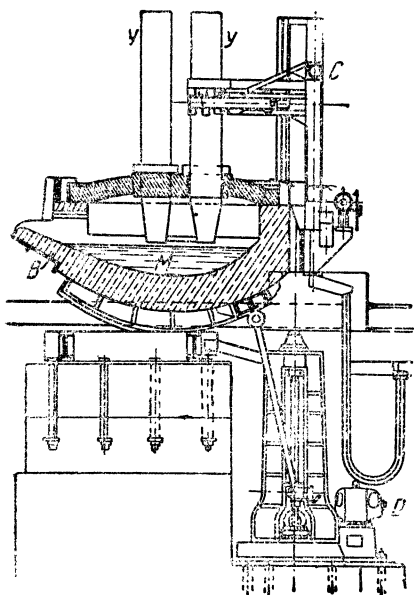
Фиг. 146. Сварочная машина (контактная сварка).

Контактная сварка производится несколько иначе в случае необходимости соединить края листового металла внакладку и т. п. Для этого применяют особое устройство (фиг. 146), включающее в себе сварочный трансформатор. Между толстыми медными электродами A_1 и A_2 , подводящими ток от трансформатора T , зажимаются свариваемые железные листы и тому подобные части. При нажатии, производимом посредством ножной педали, джоулево тепло выделяется главным образом в очень ограниченном месте контакта между железными листами, как раз у медных электродов, и сварка происходит только в этом месте. Такого рода электросварка называется *точечной*. Для получения надежного соединения по всему шву обычно повторяют точечную сварку во многих местах. Это несколько напоминает соединение при помощи ряда заклепок.

Для получения непрерывного шва контактной сваркой применяют вместо простых медных электродов A_1 и A_2 (фиг. 146) медные ролики, особо охлаждаемые водой. Между этими роликами, более или менее сильно сжимаемыми, протягивают свариваемый шов. Подобным путем изготовляют, например, сварные трубы, баки и разного рода сосуды.

71. ПРИМЕЧАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ В МЕТАЛЛУРГИИ И В ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Электрические печи получили значительное распространение в металлургической промышленности для выработки высококачественного металла, главным образом в области черной металлургии, т. е. в области производства различных сортов



Фиг. 147. Дуговая электрическая печь Геру́.

печи является печь Геру́¹, изображенная на фиг. 147. Печь состоит из ванны *В*, которая заполняется металлом *М*, подлежащим обработке. Над ванной устанавливаются два или три (в зависимости от числа фаз) электрода *УУ* в виде толстых стержней из угля или графита. Для поддержания электродов, для поднимания и опускания их, а также для подведения к ним тока каждый электрод укрепляется в особой обойме, которая может передвигаться вдоль стойки *С* вверх и вниз при помощи особых приспособлений (на рисунке все это показано только для одного электрода). Вольтовые дуги, две или три, в зависимости от числа электродов, образуются между металлом и нижними концами электродов. Выделяемое дугами тепло передается металлу. После окончания плавки металла для выливания его печь наклоняется при помощи механизма, приводимого в движение вспомогательным электродвигателем *Д*.

Другой тип дуговой печи, предложенный французским инженером Жиро́, схематически изображен на фиг. 148. Здесь один из электродов расположен над ванной, а другой снизу

стали и вообще металла на основе железа, к которому добавляются разного рода полезные примеси (кремний, хром, ванадий и т. п.). Чаще всего применяются дуговые электрические печи. Практически почти все тепло, развиваемое в вольтовой дуге, используется в этих печах для нагрева металла.

В настоящее время дуговые печи строятся исключительно для работы на переменном токе (трехфазном или однофазном), так что в данном случае отпадает необходимость установки дорогостоящих преобразователей трехфазного тока в постоянный. Способы устройства дуговых металлургических печей бывают весьма различны. Наиболее часто применяемым типом дуговой

¹ Геру́ — имя французского инженера, разработавшего описываемый тип печи.

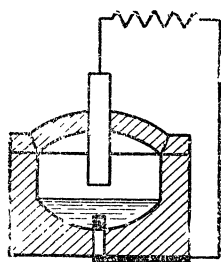
входит в дно ванны. Верхний электрод делается из угля или графита, а нижний — железный, иногда охлаждаемый изнутри водой.

На фиг. 149 схематически изображена дуговая печь с прсводящим подом, в котором проходящий ток выделяет джоулево тепло, также идущее на нагрев металла. В нижнюю часть пода ванны закладывается железный электрод, покрываемый затем набойкой из огнеупорного материала с примесью угля. Таким образом получается проводящий слой, обладающий довольно значительным сопротивлением. При прохождении тока сквозь этот слой и выделяется джоулево тепло. Такого рода печи можно рассматривать как пример соединения отличительных особенностей дуговых печей и печей сопротивления.

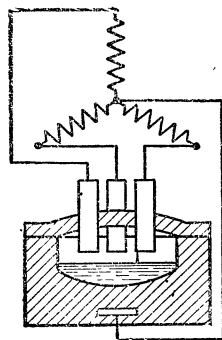
Рассмотренные схемы дуговых печей не являются единственно возможными. В настоящее время разработано много различных типов электрических печей для металлургических целей и предложено большое количество схем электрического соединения, пригодного для питания этих печей от цепи трехфазного тока. Описанные выше печи необходимо рассматривать только как некоторые основные примеры. Сказанное полностью относится и ко всему дальнейшему.

Кроме дуговых печей с п р я м ы м н а г р е в о м (фиг. 147—149) в металлургическую практику вошли и дуговые печи с н е п р я м ы м н а г р е в о м, в которых вольтовые дуги непосредственно не касаются поверхности обрабатываемого металла, а горят отдельно над поверхностью металла, нагреваемого теплом, которое излучается дугой. Пример такого рода печи в схематическом виде представлен на фиг. 150 (тип итальянского инженера Стассано). В подобных печах нет столь значительных местных перегревов металла, как это имеет место в дуговых печах с прямым действием вольтовых дуг на его поверхность. В связи с этим печи с непрямым нагревом особенно успешно могут применяться для плавки цветных металлов.

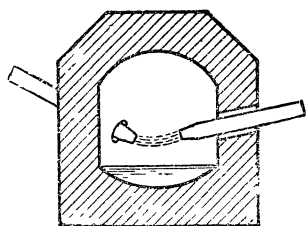
Для ослабления местных перегревов пригодны печи с в р а щ а ю щ е й с я д у г о й, которые имеют общее расположение электродов, подобное представленному на фиг. 148.



Фиг. 148. Схема дуговой электрической печи Жиро.



Фиг. 149. Схема дуговой печи с проводящим подом.



Фиг 150. Схема дуговой печи Стассана (с непрямым нагревом).

Отличие заключается в том, что в под печи заделывается, включаемая последовательно с электродом катушка из медной трубки, охлаждаемой водой. Вертикально направленное магнитное поле этой катушки заставляет нижний конец сравнительно длинной дуги двигаться по окружности со скоростью, зависящей от силы магнитного поля. Обычно применяется скорость около 150 оборотов в минуту. Благодаря непрерывному вращению дуги не получается местных перегревов и угара металла. Таким образом печь с вращающейся дугой соединяет в себе преимущества печей с прямым и непрямым нагревом, и в этом заключается ее ценное свойство.

Мощность, потребляемая дуговыми печами, обычно бывает весьма значительна. Она колеблется от сотен киловаттов (в малых печах) до тысяч киловаттов (в больших печах). Загрузка металла в ванну печи сходит иногда до нескольких тонн, в отдельных случаях — свыше 20 тонн.

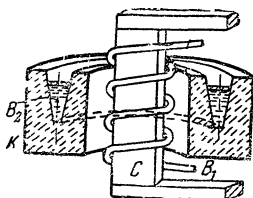
Соответственно большой мощности и большой силе тока, питающего вольтовы дуги, размеры угольных или графитовых электродов также бывают значительные. Угольные электроды при длине до 2 000 миллиметров имеют поперечные размеры до 500 миллиметров у круглых электродов, при прямоугольном сечении — до 700×700 квадратных миллиметров. Графитовые — при длине в 1 200 миллиметров бывают толщиной до 300 миллиметров.

По мере сгорания электродов их обычно наращивают сверху новыми, навинчивая друг на друга или применяя какие-либо иные способы соединения.

В тех случаях, когда стоимость электрической энергии это допускает, дуговые печи применяются также для выплавки чугуна из руд. Подобные электрические домны, работающие в основном так же, как и обычные, имеют то отличие от них, что в нижней части, в области горна, располагают толстые угольные стержни — электроды, между которыми горят вольтовы дуги, потребляющие от 2 000 до 10 000 киловаттов. Преимуществом электрических домен является значительное уменьшение потребления кокса или угля, идущего только на восстановление железа из руды, а не на выделение тепла. Благодаря этому уменьшается и содержание вредных примесей в чугуне, поступающих в него из кокса или угля.

Кроме дуговых электрических печей, в металлургии применяются еще так называемые индукционные печи, осно-

ванные на том, что в массе металла возбуждают переменным магнитным потоком столь сильные индуктированные токи, что выделяемое ими джоулево тепло разогревает металл и доводит его до надлежащей температуры. На фиг. 151 схематически представлен разрез индукционной печи, питаемой от цепи обычного переменного тока с частотой в 50 герцев. Здесь C — железный сердечник, подобный трансформаторному. Он обвит первичной обмоткой B_1 . Роль вторичной обмотки, состоящей в данном случае из одного короткозамкнутого витка, играет металл B_2 , налитый в желоб кольцеобразной ванны K , изготовленной из соответствующего огнеупорного материала. Металл обычно наливают в желоб, предварительно расплавив обычным способом, в электрической же печи добавляют к нему необходимые примеси и доводят его до надлежащего качества. Мощность подобных печей, применяемых на практике, колеблется примерно от 100 до 1 000 киловаттов.



Фиг. 151. Схема индукционной печи.

Для питания индукционных печей на сравнительно небольшую мощность, особенно для лабораторных индукционных печей, нередко пользуются переменным током высокой частоты, например, в 10 000 герцев. Этот ток пропускают через катушку, внутри которой, отделив его необходимой тепловой изоляцией, помещают тигель с загруженным в него металлом. Создаваемое катушкой переменное магнитное поле высокой частоты индуктирует в массе металла сильные токи, которые выделяют джоулево тепло, расплавляющее металл. В промышленности индукционные печи высокой частоты находят себе применение для плавки более ценных металлов, как, например, золота, платины и т. п.

Здесь же попутно укажем, что нагрев при помощи высокочастотных токов в последнее время находит широкое применение для поверхностной закалки стальных изделий. С этой целью подвергают эти изделия воздействию со стороны высокочастотных магнитных полей, создаваемых специальными катушками, по которым пропускают токи высокой частоты. При достаточной силе высокочастотных магнитных полей достигается быстрый нагрев только поверхностного слоя металла, а затем закамливают поверхностный слой при помощи соответствующих охлаждающих жидкостей (способ этот разработан в СССР проф. В. П. Вологдиным).

Электрические печи, как дуговые, так и основанные на использовании джоулева тепла, выделяемого в проводе (печи сопротивления), приобрели важное значение и в ряде производств из области химической промышленности. В виде при-

мера можно прежде всего назвать производство так называемого карбида кальция, представляющего собой химическое соединение углерода (по-латыни «карбо») и металла кальция. Карбид кальция является очень ценным исходным продуктом, необходимым для получения некоторых других химических соединений (газ ацетилен, содержащие азот удобрения и т. д.). Для получения карбида кальция смешивают в надлежащей пропорции окись кальция (известь) и уголь, а затем эту смесь нагревают до очень высокой температуры в дуговой электрической печи. Образующийся карбид кальция в расплавленном виде собирается в нижней части печи, откуда он время от времени выпускается наружу и наливается в металлические корбки, где и застывает. В настоящее время для производства карбида кальция применяются дуговые печи, которые в отдельных случаях потребляют десятки тысяч киловаттов. На применении электрических же печей (печей сопротивления) основано и производство искусственного графита, а также карборунда, являющегося весьма ценным материалом, употребляемым для всякого рода шлифовки.

72. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

К области электрохимической промышленности относятся те производства, которые в основном имеют отношение к использованию явлений электролиза (см. законы Фарадея, § 43, гл. 4).

Электролитическая очистка меди занимает одно из видных мест в электрохимической промышленности. Сырая медь, непосредственно добытая из руд, обыкновенно содержит в виде более или менее незначительных примесей целый ряд других металлов, как-то: серебро, золото, платину, свинец, никель, железо и т. д., а также некоторые неметаллические примеси. Все это в общем ухудшает качество меди. Электротехническая промышленность особенно нуждается в высокосортной меди, по возможности очищенной от посторонних примесей. В хорошей меди примеси допускаются в количестве, не превышающем нескольких тысячных долей процента. Для получения такой очищенной меди в настоящее время применяется исключительно электролиз. Из сырой меди отливают толстые анодные пластины. Катодные тонкие пластины изготавливаются из чистой электролитической меди. Все эти электродные пластины попеременно подвешиваются в деревянных просмоленных баках, в которые наливается электролит, состоящий из раствора медного купороса с примесью серной кислоты. В каждом баке все анодные пластины соединяются вместе электрическим проводом. То же делается и с катодными пластинами. Последовательно соединяются сотни

подобных ванн, и все приключается к зажимам динамомашин постоянного тока с напряжением около 100 вольт. На каждую ванну приходится от $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{3}$ вольта. При прохождении тока медь с анодов переходит в раствор и далее в практически чистом виде осаждается на катоды, наращиваясь в конце концов в виде толстого слоя. Серебро, золото, платина и некоторые другие примеси падают на дно баков и дают осадок. Часть примесей переходит в раствор, который время от времени сменяют. Переработка осадка, содержащего все драгоценные металлы, бывшие в сырой меди, и извлечение этих металлов весьма часто с избытком окупают всю стоимость электролитической очистки меди. В связи с этим почти вся добываемая медь подвергается такого рода очистке.

Электролиз применяется также при добыче и переработке других металлов. Между прочим, в золотопромышленности породы, содержащие золото в очень измельченном виде, дробятся и размалываются, а затем обрабатываются раствором цианистого калия, который химически действует на этот металл, растворяя его. Золото извлекают из раствора, осаждая его электролитически на катоды из тонкого листового золота.

Современная алюминиевая промышленность полностью основана на электролитическом извлечении алюминия из расплавленных солей и соединений этого металла при температуре до 1000°C . Ванны делают из железных листов. Дно, служащее катодом, на котором отлагается алюминий, снабжено угольной набойкой. Угольный анод подвешивается сверху. Стенки ванны обычно покрыты твердым, застывшим электролитом. В средней же части, в области, где идет электролиз между анодом и катодом, электролит поддерживается в расплавленном состоянии джоулевым теплом, которое выделяется в необходимом для этого количестве, так как через ванну пропускают достаточно сильный ток. Строятся ванны на десятки тысяч амперов. Напряжение, приходящееся на ванну, достигает 6—7 вольт.

В целом ряде случаев электролизом же пользуются при производстве некоторых сложных химических соединений, а также для добывания хлора, водорода и кислорода.

В настоящее время широко распространено техническое применение электролиза для покрытия разного рода предметов тонким металлическим слоем. Это — одна из отраслей гальванотехники¹. Всем хорошо известно гальваническое золочение, серебрение, никелирование, хромирование самых разнообразных металлических изделий. Для покрытия поверхности какого-либо

¹ В честь Гальвани электрический ток в прежние время назывался «гальваническим» током.

металлического предмета тонким слоем другого металла, данный предмет после предварительной очистки погружают в качестве катода в раствор соли требуемого металла и, взяв анод из этого же металла, пропускают ток через электролит. В зависимости от времени пропускания тока и от его силы толщина слоя покрытия получается по желанию большей или меньшей. Гальваническое покрытие разнообразных металлических изделий широко применяется главным образом с целью предохранения поверхности этих изделий от окисления.

Большое практическое значение имеет и другая отрасль гальванотехники, известная под названием г а л ь в а н о п л а с т и к и ¹. Речь идет об электролитическом осаждении более или менее толстого металлического слоя на поверхности какой-либо основы с целью получения точного слепка с нее. Изобретателем гальванопластики был Якоби ². Для того чтобы осажденный толстый слой металла легко отделялся от основы (формы), служившей при электролизе катодом, принимают особые меры. В случае металлической основы поверхность ее протирают тонко измельченным графитом. Иногда применяют основу из легкоплавкого металла, который потом выплавляют после осаждения на основу слоя, например, меди. Так поступают при изготовлении труб, автомобильных радиаторов и иных полых металлических изделий. Когда требуется точно воспроизвести скульптуру и вообще какое-либо художественное произведение, обычно снимают с него форму из непроводящего материала: смолы, воска и т. п. Чаще всего эта форма делается разборная. Для того чтобы на непроводящую форму мог электролитически осаждаться металл, поверхность ее покрывают тонким слоем графита. Этот слабо проводящий слой сначала и служит катодом, на который первоначально очень медленно осаждается металл. После образования тонкого металлического осадка на него затем легко наращивается сколь угодно толстый слой металла.

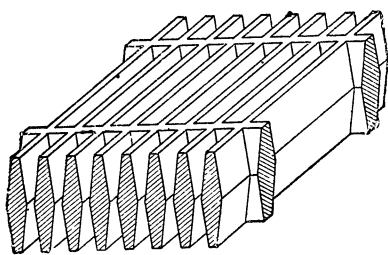
Отметим еще получение изолирующих слоев при помощи электролиза. Если взять в качестве анода алюминиевую проволоку или пластинку и поместить ее, например, в раствор двууглекислой соды, применив свинцовую пластинку как катод, то при пропускании тока через электролит выделяющийся на алюминиевом аноде кислород образует тончайшую поверхностную пленку, представляющую собой нерастворимое соединение алюминия и кислорода. Пленка эта является очень хорошим изолятором. По мере образования ее на поверхности алю-

¹ По-гречески «пласэйн» значит «давать форму», «лепить».

² Б. С. Якоби (1801—1874) — выдающийся русский физик и техник, член петербургской Академии наук. Известен многочисленными исследованиями и изобретениями (электродвигатель, гальванопластика, телеграфия).

миниевого анода ток ослабевает и в конце концов почти прекращается, проходя лишь через тончайшие поры, всегда остающиеся в пленке. Электролитическое покрытие алюминия тончайшей изолирующей пленкой нашло немало практических приложений. Так, алюминиевая проволока, обработанная описанным способом, а затем хорошо промытая водой и просушенная, оказывается изолированной и в ряде случаев может применяться без дополнительной изоляции. Алюминиевая пластина, служащая анодом в электролите, благодаря образовавшейся изолирующей пленке ведет себя как одна из обкладок конденсатора, другой обкладкой которого служит электролит. Получается так называемый электролитический конденсатор, достоинством которого является сравнительно большая емкость при малом объеме. Однако, он не может работать при напряжениях свыше 300—400 вольт. Описанное явление образования изолирующей пленки на алюминии позволяет довольно просто осуществлять выпрямление переменного тока. Дело в том, что эта пленка почти прекращает ток, когда алюминиевый электрод, погруженный в надлежащий электролит, служит анодом. Если же изменить направление тока, то даже при наличии пленки ток проходит, почти не ослабляясь пленкой. Объясняется это тем, что электролит вгоняется силами электрического происхождения внутрь пор и дает хороший контакт с алюминиевым электродом-катодом. Наоборот, эти же силы выгоняют электролит из пор и производят почти полный разрыв цепи, когда алюминиевый электрод служит анодом, причем в темноте наблюдается свечение пленки в огромном количестве точек, т. е. там, где прерывается в порах ток. Пропуская через описанное устройство ток от цепи переменного тока с действующим напряжением, не превышающим 250—300 вольт, мы увидим, что ток проходит почти только в одном направлении, именно в том, при котором алюминий служит катодом. Подобного рода алюминиевый выпрямитель применялся иногда в малых установках для зарядки аккумуляторов от цепи переменного тока и т. п. В последнее время алюминиевый выпрямитель практически вытеснен более совершенными выпрямителями, основанными на применении разряда через газы и через вакуум (ртутные выпрямители и т. п.), а также выпрямителями, в которых используется односторонняя проводимость на границе металла и слоя так называемого полупроводника.

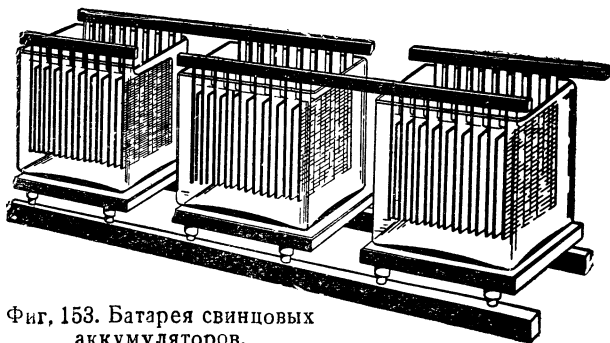
К области электрохимической промышленности относится и производство гальванических элементов, а также аккумуляторов. Фабричным путем в настоящее время изготавливаются почти исключительно сухие гальванические элементы, устройство которых было вкратце описано в § 43 (гл. 4). Скажем несколько слов о производстве наиболее распространенных



Фиг. 152. Участок поверхностной пластины свинцового аккумулятора.

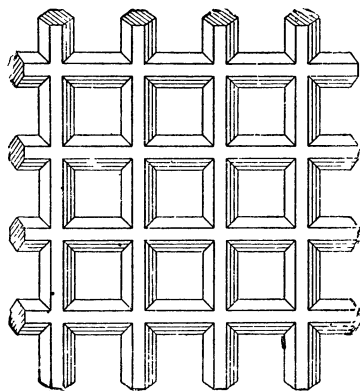
свинцовых аккумуляторов. Так как емкость таких аккумуляторов, т. е. количество запасаемых в них ампер-часов, зависит от действующей поверхности свинцовых электродов, погруженных в раствор серной кислоты, то при производстве принимаются меры к тому, чтобы сделать эту поверхность возможно больше. Достигают этого двумя спосо-

бами. По первому способу, отливают из свинца пластины, обладающие сильно развитой поверхностью благодаря большому количеству глубоких впадин. В виде примера на фиг. 152 изображен отдельный участок подобный пластины. Поместив в большой сосуд определенное количество таких пластин на некотором расстоянии одна от другой, электрически соединяют их через одну, как показано на фиг. 153, так что пластины разбиваются на две группы. Затем соединяют последовательно ряд элементов и заливают сосуды раствором серной кислоты. Наконец, пропуская ток через всю батарею последовательно соединенных элементов, заряжают их в одном направлении (§ 43), причем на поверхности всех анодов в основном образуется перекись свинца, а на катодах остается чистый свинец. После этого разряжают аккумуляторы и снова заряжают их в другом направлении. Тогда перекись свинца на бывших анодах раскисляется водородом и свинец перекиси восстанавливается в виде слоя губчатого свинца. Бывшие же катоды покрываются перекисью свинца. Повторяя многократно изменение направления тока, действующего на свинцовые пластины электролитически, в конце концов получают на одних пластинах довольно значительный слой губчатого свин-



Фиг. 153. Батарея свинцовых аккумуляторов.

ца, имеющего благодаря порам значительную действующую поверхность, на других же пластинах—пористый слой перекиси свинца, также с большой действующей поверхностью. Таким образом емкость аккумуляторной батареи получается достаточно большой. Вся описанная электролитическая обработка свинцовых пластин называется их *формованием*. Для ускорения формования обычно к раствору серной кислоты добавляют некоторые азотнокислые или хлорные соли, благодаря чему надлежащее разрыхление поверхности свинца заканчивается в 10—15 зарядок и разрядок. После формования пластин их тщательно промывают в чистой воде и затем собирают из них отдельные аккумуляторные элементы или целые батареи, заливая их для нормальной работы раствором возможно более чистой серной кислоты. При этом анодами всегда служат пластины с перекисью свинца, а катодами — пластины с губчатым свинцом. Изготовленные по описанному способу пластины называются *поверхностными*.



Фиг. 154. Участок свинцовой решетки для массовых пластин.

Сущность второго способа производства свинцовых аккумуляторных пластин сводится к тому, что для избежания длительного процесса образования на них губчатого свинца и перекиси свинца отливают свинцовые решетки (см., например, фиг. 154), в ячейки которых вмазывают тесто, составленное из свинцовой пыли с серной кислотой или из окислов свинца (сурика и глета) с серной же кислотой. После сушки пластины формируют в основном подобно поверхностным пластинам, ограничиваясь небольшим числом зарядок и разрядок. Получают подобным способом так называемые *массовые пластины* (в них сразу же была заложена действующая масса в виде теста).

На практике нередко в одном аккумуляторе ставят поверхностные аноды и массовые катоды. Аккумуляторные элементы окончательно собирают в стеклянных сосудах, в деревянных ящиках, выложенных свинцом, или же, наконец, в эбонитовых ящиках. Переносные аккумуляторные батареи чаще всего состояются из нескольких эбонитовых ящиков, установленных в одном общем деревянном ящике. Эбонитовые же крышки отдельных аккумуляторных элементов сверху заливаются

смолой. При зарядке аккумуляторных батарей необходимо строго следить за тем, чтобы постоянный ток направлялся к аноду, обычно отмечаемому знаком $+$.

Производство железо-никелевых аккумуляторов, в которых применяется электролит, состоящий из раствора щелочных соединений, несколько сложнее только что описанного, и мы не будем входить в его рассмотрение.

73. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ГАЗОВ

В современной промышленности целый ряд производств связан с отходом газов, содержащих в виде пыли различные вещества. Почти всегда оказывается целесообразным прибегать к очистке этих газов от пыли. Так, например, газы плавильных печей, применяемых в металлургии, нередко содержат свинец, медь, цинк, мышьяк и тому подобные примеси, вредно действующие на здоровье рабочих и окружающего населения, а также на растительность вокруг заводов. То же можно сказать о некоторых химических производствах. Цементные заводы при переработке сырья дают большое количество пыли, осаждающейся на значительном пространстве вокруг этих заводов. Дым тепловых электрических станций уносит мельчайшие частицы угля. В населенных местах угольная пыль, непрерывно осаждаясь, причиняет много неудобств.

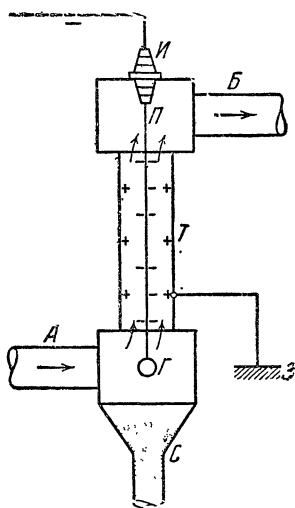
Существуют электрические способы улавливания пыли из отходящих газов. В большинстве случаев, помимо выгод, достигаемых в смысле охраны здоровья и в отношении освобождения от вредной пыли вообще, улавливаемая пыль имеет большую ценность, и, таким образом, в результате работы электроочистителей сохраняется часть материалов, идущих затем снова в производство. Есть примеры, когда количество улавливаемой пыли составляет от 5 до 10% всей производительности предприятия. Сохранение ценных материалов весьма часто покрывает расходы по установке и содержанию электроочистителей.

На фиг. 155 схематически изображен *трубчатый очиститель*. Устройство его заключается в следующем. Внутри стальной трубы *Т* располагается тонкая проволока *П*, подвешенная на специальном высоковольтном изоляторе *И*, вставленном в верхнюю часть трубы. На конце проволоки имеется груз *Г*, натягивающий эту проволоку. Стальная труба соединяется с положительным полюсом высоковольтного источника постоянного тока и обычно ради безопасности присоединяется к земле *З*. Проволока *П* приключается к отрицательному полюсу того же источника тока. Газ, подлежащий очистке, входит снизу через трубопровод *А*, проходит в трубе *Т* сквозь область, занятую электрическим полем, и затем, очистившись от пыли, выходит через трубопровод *Б*. При разности потен-

циалов в 50—60 киловольтов между гонкой проволокой и стальной трубой создается электрическое поле, сопровождаемое возникновением явления короны (см. § 44, гл. 4), облегающей проволоку. В связи с этим в пространстве, занятом особо сильным электрическим полем, т. е. в области короны, газ подвергается ионизации. В большом количестве образуются газовые ионы. Положительные ионы силами электрического поля направляются к отрицательно заряженной проволоке, а отрицательные ионы (в основном — электроны) — к положительно заряженной внутренней поверхности трубы. При движении ионы встречают на своем пути увлекаемые газами частицы пыли и, связываясь с ними, заряжают их положительным или отрицательным электричеством. Благодаря этому частицы пыли, получившие заряд, сами устремляются к противоположно заряженным электродам и оседают на них. Большая часть пыли осаждается на стальной трубе и сравнительно немного — на проволоке. Образующиеся на электродах скопления пыли падают под действием собственного веса или под влиянием механических сотрясаний трубы *T* и проволоки *И*, накапливаясь в сборнике *С*, откуда их время от времени удаляют.

Так как скорость, прохождения газа сквозь трубу *T* не должна быть слишком велика, то при большом объеме газов, подлежащих очистке, применяют ряд параллельно расположенных стальных труб, каждая из которых оборудуется подобно изображенной на фиг. 155. Кроме трубчатых, применяются еще плоские очистители. Они состоят обычно из бетонной камеры, в которой подвешены стальные пластины, стоящие одна от другой на 20—30 сантиметров. Между этими пластинами, играющими ту же роль, что и стальная труба в описанном выше устройстве, подвешивается некоторое количество проволок, присоединяемых к отрицательному полюсу высоковольтного генератора, положительный полюс которого приключается к пластинам. В основном действие плоского электроочистителя происходит так же, как и трубчатого.

В качестве генератора постоянного тока обыкновенно применяют устройство, состоящее из высоковольтного трансформатора и выпрямителя переменного тока в постоянный.

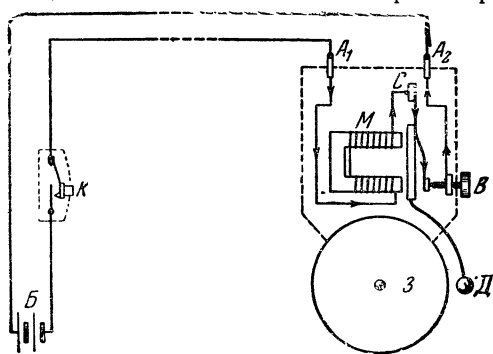


Фиг. 155. Общая схема трубчатого электроочистителя для газов.

74. ЭЛЕКТРОСВЯЗЬ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИГНАЛИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

В предыдущем изложении мы далеко не исчерпали всех технических применений электрической энергии. Мы коснулись только самого главного. Считаем необходимым отметить, что во всех описанных выше случаях мы имели дело с такого рода использованием электрической энергии, при котором то или иное действие, произведенное за счет этой энергии, вообще говоря, всегда прямо соответствует количеству потребленных киловатт-часов. Это все были области, имеющие самое непосредственное отношение к электроэнергетике. Не останавливаясь особо на таких чисто специальных областях применения электрической энергии, как медицина, лабораторная практика и т. п., мы скажем еще несколько слов об одной весьма важной области, имеющей лишь косвенное отношение к существу электроэнергетического хозяйства. В этой области количество израсходованной энергии играет лишь более или менее второстепенную роль. Главным же здесь является подача при помощи электрической энергии тех или иных, нередко чисто условных, сигналов и приказаний. Электрическая энергия в данном случае является только промежуточным средством для выполнения некоторого действия, основная ценность которого ни в какой мере не зависит от стоимости потребленной энергии. Речь идет о всякого рода с и г н а л и з а ц и и, о телеграфии¹, телефонии² и т. п.

Простейшим примером подобного рода сигнализации может служить электрический звонок, устройство и общая схема включения которого представлены на фиг. 156.



Фиг. 156. Общая схема цепи электрического звонка.

Электромагнит *М* может возбуждаться током, идущим от зажима *А*₁, проходящим по обмотке электромагнита и затем поступающим в металлическую стойку *С*, к которой при помощи плоской стальной пружины прикреплен железный якорь. От якоря через контактную часть и винт *В* ток выходит к зажиму *А*₂. К нижнему

¹ По-гречески «тэле» значит «далеко», а «графо» — «пишу».

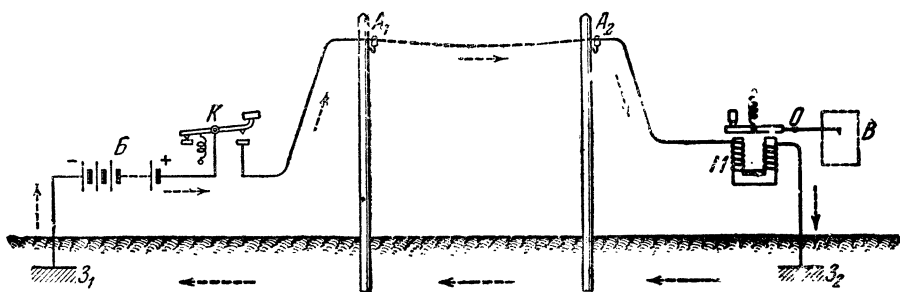
² По-гречески «фонэ» значит «голос», «звучание».

концу якоря прикреплен молоточек D , который ударяет по звонку Z в случае притяжения якоря электромагнитом. Цепь тока от батареи B может замыкаться путем нажатия так называемой кнопки K . При этом благодаря наличию указанного контактного устройства, как только якорь притянется электромагнитом и молоточек D ударит по звонку, тотчас же разомкнется контакт, и ток прервется. Тогда прекратится возбуждение электромагнита, якорь отойдет в первоначальное положение, и ток снова замкнется. Произойдет второй удар молоточка по звонку и т. д. Звонки не перестают звонить, пока нажата кнопка K . Провода, соединяющие место расположения кнопки и звонок, вообще говоря, могут быть произвольно длинные. Таким образом электрическим звонком можно подавать сигнал в более или менее удаленные места.

Электрический телеграф в настоящее время представляет собой одно из самых распространенных средств передачи письменных сообщений с чрезвычайно большой скоростью, на сколь угодно большие расстояния. Этот вид электросвязи до сих пор в огромном большинстве случаев применяется в форме проволочного телеграфа, устраиваемого в основном следующим образом. В месте отправления телеграммы¹ располагается так называемый передатчик, назначение которого состоит в том, чтобы замыкать ток в надлежащие моменты времени. С целью удешевления линии, передающей сигналы к приемнику, обычно применяют не два металлических проводника, а только один, чаще всего железный. В качестве второго проводника, или, как говорят, обратного провода, служит земля, с которой начало и конец телеграфной линии соединяются при помощи металлической пластины, закапываемой во влажную почву. Ввиду того что в телеграфной практике применяются слабые токи порядка одной-двух сотых долей ампера, такого рода заземление оказывается вполне достаточным. Основной частью телеграфного приемника в огромном большинстве случаев является электромагнит, который при прохождении тока через его обмотку притягивает якорь и приводит в действие механизм, записывающий полученный сигнал на бумаге.

Общая схема телеграфной линии с включенными в нее передатчиком и приемником представлена на фиг. 157. Цепь электрического тока состоит из источника тока, в данном случае батареи B , из передатчика — так называемого ключа — K , при помощи которого в определенные моменты времени производится замыкание контакта, из телеграфной линии A_1A_2 , подвешиваемой чаще всего на столбах, а иногда прокладываемой под землей, и, наконец, из приемника,

¹ «Грámма» по-гречески значит «письмо».

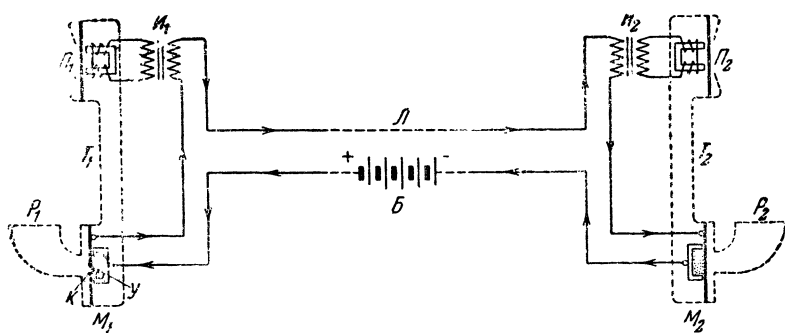


Фиг. 157. Общая схема проволочной телеграфной связи.

основной частью которого обычно является электромагнит M , притягивающий якорь при прохождении тока. Цепь замыкается через заземления Z_1 и Z_2 . При замыкании контакта передатчиком K ток пройдет в направлении, показанном пунктирными стрелками. Телеграфная линия A_1A_2 , показанная пунктиром, может быть очень длинной. В отдельных случаях она достигает нескольких тысяч километров и обслуживается многими тысячами столбов. Телеграфный провод крепится на фарфоровых или стеклянных изоляторах, устанавливаемых на железных крюках или на особых поперечинах в верхней части столбов. При прокладке линии через водные пространства применяют специальный телеграфный кабель, представляющий собой медную жилу, покрытую надежной изоляцией, поверх которой, для придания прочности и для защиты от возможных повреждений, обычно накладывают броню из стальных проволок или лент. В некоторых случаях, например при телеграфной связи Европы с Америкой, подводный кабель, опущенный на дно океана, имеет в длину несколько тысяч километров.

Телеграфный приемник, схематически изображенный на фиг. 157, в основном обычно состоит, как указано выше, из электромагнита M , возбуждаемого при прохождении тока. В пишущем приемнике Мórзе¹ железный якорь, притягиваемый электромагнитом M , составляет одно целое с рычагом. При этом рычаг поворачивается вокруг оси O и другим своим концом, на котором находится перо особого устройства, делает отметки на бумажной ленте, протягиваемой мимо пера при помощи заводного механизма B . Такого рода отметки могут быть короткие (точки) или сравнительно более длинные (тире), в зависимости от времени нажатия контактного устрой-

¹ Мórзе (1791—1872)—американский изобретатель, был первым, построившим электрический телеграфный аппарат, вполне пригодный для широкого практического применения.



Фиг. 158. Общая схема проволочной телефонной связи.

сываемого электромагнитом приемного аппарата как раз тогда, когда необходимая буква находится над бумажной лентой. Передатчик буквопечатающего телеграфа представляет собой более или менее сложный аппарат с клавишами, как у пишущей машинки. Передатчик обеспечивает посылки тока на станцию приема в моменты времени, точно соответствующие отдельным буквам.

Вторым весьма важным средством электросвязи является телефон, при помощи которого на значительные расстояния может быть передаваема человеческая речь. Таким образом два лица могут вести разговор непосредственно друг с другом, независимо от разделяющего их расстояния. На фиг. 158 изображена общая схема телефонной передачи, поясняющая устройство отдельных частей. На двух концах телефонной линии находятся телефонные трубки T_1 и T_2 , для ясности показанные на фиг. 158 в разрезе, причем пунктиром представлены наружные обводы трубок. Каждая трубка заключает в себе микрофон¹ M_1 или M_2 и собственно телефон P_1 или P_2 . Микрофоном называется устройство, воспринимающее разговор через раструб P_1 или P_2 и производящее изменения силы электрического тока в соответствии с звуковыми колебаниями. Такого рода действие микрофона имеет место, вообще говоря, даже при очень слабых звуках, чем и объясняется название данного прибора. Устраивается он обычно следующим образом. В угольную чашечку $У$ насыпается порошок, состоящий из мелких угольных зерен; чашечка прикрывается тонким угольным кружком $К$, называемым мембраной² и непосредственно не соприкасающимся с краями угольной чашечки $У$. Для того чтобы угольный порошок не

¹ По-гречески «микрос» обозначает «малый», «слабый», а «фонэ» обозначает «голос», «звучание».

² Латинское слово «мембрана» обозначает «перепонка».

мог высыпаться через образовавшуюся щель, она заполняется тонким войлочным кольцом или окружается таким кольцом (на фиг. 158 не показанным). Благодаря своей мягкости войлочное кольцо не препятствует мембране K колебаться под влиянием звуков, падающих на нее через раструб P , перед которым говорят. Колебания мембраны производят непрерывно изменяющееся сжатие угольного порошка, электрическое сопротивление которого при этом все время изменяется, влияя на силу тока в цепи, где действует постоянная э. д. с. батареи B . Телефонные приемники P_1 и P_2 производят обратное преобразование изменяющегося под действием микрофона тока — в звуковые колебания. Приемники эти состоят из небольшого электромагнита, перед полюсами которого, на очень близком расстоянии, расположена круглая мембрана из тонкого листового железа. Для правильной работы телефона сердечники его электромагнита обычно подмагничиваются постоянным магнитом, не показанным на фиг. 158.

Обмотки телефонов включаются в общую цепь не непосредственно, а через небольшие трансформаторы в виде индукционных катушек I_1 и I_2 , благодаря чему постоянный ток от батареи B не проходит по обмоткам электромагнитов, а возбуждаются они только токами переменного направления, индуктируемыми в связи с изменениями микрофонного тока в главной цепи. Благодаря колебаниям магнитного потока электромагнитов, железные мембраны, играющие роль якоря, притягиваются к полюсам то сильнее, то слабее. Эти колебания железных мембран телефонных приемников происходят в соответствии с колебаниями угольных мембран микрофонов. Таким образом звуки разговора, попадающие в раструбы P_1 и P_2 , воспроизводятся телефонами P_1 и P_2 , которые прикладываются к ушам. При таких условиях два собеседника, разделенные некоторым расстоянием, иногда очень значительным, могут вести переговоры друг с другом.

На фиг. 158 изображена простейшая схема телефонного соединения. В действительности она несколько усложняется и дополняется. Во-первых, для телефонного соединения лиц, желающих вести переговоры, устраиваются центральные телефонные станции, к которым подводятся провода от всех телефонных аппаратов, установленных в данном городе или районе. Через телефонные же станции производятся все соединения при междугородных переговорах. Во-вторых, телефонные аппараты дополняются электрическим звонком и рядом других частей, необходимых для вызова. Иногда каждый телефонный аппарат снабжается своей местной батареей в отличие от того, что представ-

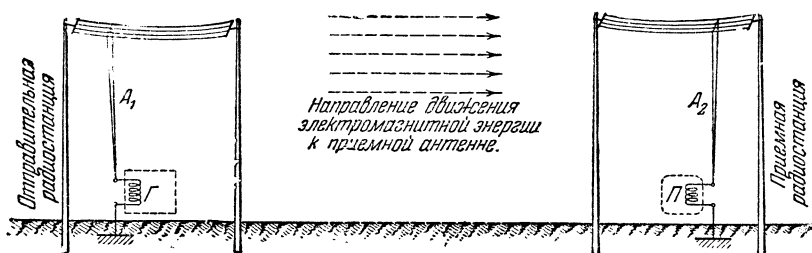
лено на фиг. 158, где показана одна центральная батарея, установленная на телефонной станции.

Рассмотренные выше способы электросвязи — проволочный телеграф и проволочный телефон — настолько широко применяются в настоящее время и настолько прочно завоевали себе место в качестве основных средств сношений, совершенно необходимых в самых разнообразных областях, что весьма трудно представить себе, как бы мы могли обойтись без такого рода проволочной связи. Все же, однако, необходимость прокладывать изолированные провода, иногда на очень большие расстояния, в целом ряде случаев представляет собой серьезный недостаток, в особенности, если отправительные и приемные устройства не сохраняют места своего расположения, а по тем или иным причинам оказываются подвижными. Изобретение беспроволочного телеграфа¹ и телефона устранило указанный недостаток. Мы имеем в виду радиотелеграф и радиотелефон, вообще область радиосвязи. В § 9—11 (гл. 1) мы говорили об электромагнитной энергии, которая излучается радиостанциями в окружающее пространство в форме электромагнитных колебаний. Распространяясь на очень большие расстояния через эфир, эти электромагнитные колебания могут служить средством связи, так как на отправительной радиостанции при помощи управления мощностью излучаемой энергии легко посылать разного рода сигналы, которые улавливаются приемной радиостанцией и воспроизводятся специальными приборами в виде телеграфных знаков или в форме звуков (человеческой речи, музыки).

Основная часть устройства отправительной радиостанции представляет собой генератор переменного тока очень высокой частоты, которая в отдельных случаях достигает десятков миллионов герцев. К цепи высокочастотного генератора тем или иным способом присоединяется так называемая антенна², обычно состоящая из вертикального провода, во многих случаях дополняемого в верхней части горизонтальными проводами, а нижним концом присоединяемого к земле. Эта отправительная антенна излучает в окружающее пространство электромагнитные колебания. На приемной радиостанции в подобной же прием-

¹ Беспроволочный телеграф был изобретен в 1895 г. русским изобретателем — проф. А. С. Поповым (1859—1905).

² Латинское слово «антénна» обозначает деревянную часть, прикрепляемую к мачте и служащую для подвязывания парусов. В радиотехнике антенной называется деревянное или металлическое сооружение, нередко очень высокое, которое поддерживает провод, излучающий или принимающий электромагнитную энергию. Наконец, очень часто антенной называют этот именно провод.



Фиг. 159. Общая схема радиосвязи.

ной антенне доходящие до нее электромагнитные колебания возбуждают часто переменные токи, которые затем в большинстве случаев усиливаются приемным устройством и преобразуются либо в телеграфные сигналы, отмечаемые каким-либо обычным в телеграфии способом, либо в телефонные токи, служащие для приведения в действие различных звуковых приборов (громкоговорителей и простых телефонов). Описанная здесь общая схема радиосвязи представлена на фиг. 159. A_1 и A_2 — отправительная и приемная антенны, Γ — генератор электромагнитных колебаний, Π — приемно-усилительное устройство.

Цепь отправительной антенны A_1 на первый взгляд кажущаяся совершенно разомкнутой, на самом деле является цепью, в которой переменный ток большой частоты, возбуждаемый генератором Γ , замыкается через емкость конденсатора (см. § 52, фиг. 72). Обкладками этого конденсатора служат верхние части антенны и земля. Здесь речь идет об электрической емкости верхних частей антенны относительно земли. Вокруг передающей антенны A_1 образуется переменное электромагнитное поле, энергия которого складывается из энергии входящих в его состав электрического и магнитного полей (см. § 10, 24 и 35, гл. 1, 2, 3). Электромагнитное поле, исходящее от антенны A_1 , в некоторой своей части оказывается настолько мало связанным с этой антенной, что свободно распространяется во все стороны, совершенно отделяясь от нее. Между прочим электромагнитная энергия движется и в направлении места расположения приемной радиостанции. Именно это и показано длинными пунктирными стрелками (фиг. 159).

Как было указано в § 11 (гл. 1), электромагнитная энергия распространяется с очень большой скоростью. В пустоте эта скорость равна 300 000 километров в секунду. В воздухе практически можно принимать ту же величину скорости. При рассмотрении свободного распространения переменного электромагнитного поля, или, как говорят, электромагнитных колебаний, обычно называют длиной волны путь, прохо-

димый этими колебаниями за время одного полного периода. Следовательно, можно написать такое соотношение:

$$\text{длина волны} = \frac{\text{скорость}}{\text{частота}}.$$

Если, например, частота равна 100 000 герцев, т. е. периодов в секунду, то имеем:

$$\begin{aligned} \text{длина волны} &= \frac{300\,000 \text{ километров в секунду}}{100\,000 \text{ периодов в секунду}} = \\ &= 3 \text{ километра} = 3\,000 \text{ метров.} \end{aligned}$$

Соответственным образом, при частоте, равной 1 000 000 герцев, длина волны составляет 300 метров. При частоте в 10 000 000 герцев длина волны равна 30 метрам и т. п.

В современной радиотехнике условно принято называть волны свыше 300 метров длинными, волны от 300 до 100 метров — средними, волны от 100 до 10 метров — короткими, наконец, волны короче 10 метров — ультракороткими¹.

Что касается устройства генераторов, которые служат для возбуждения высокочастотных переменных токов (электрических колебаний) в отправительной антенне, то в настоящее время применяются почти исключительно так называемые ламповые генераторы, основанные на использовании вакуумных приборов с электронным разрядом (см. § 44, гл. 4). Такого рода электронные лампы снабжаются управляющим устройством, так называемой сеткой, при помощи которой можно легко влиять на силу электронного тока. Разработаны разнообразные схемы, в которых создаются электрические колебания путем периодических изменений потенциала сетки генераторных ламп. Эти изменения потенциала сетки производятся либо по способу обратной связи, когда главная колебательная цепь воздействует на сетку через посредство надлежащего соединения с ней, либо по способу независимого возбуждения, когда сетка получает переменный потенциал от некоторого вспомогательного генератора высокой частоты. Во всех случаях генератор настраивается в резонанс (см. § 52, гл. 4) с цепью отправительной антенны.

При радиотелефонировании цепь отправительной антенны так или иначе связывается с микрофоном, благодаря чему мощность электромагнитного излучения претерпевает изменения, соответствующие колебаниям мембраны микрофона. Для целей радиотелеграфирования при посылке сигналов возбуж-

¹ Латинское слово «ультра» обозначает «далее», «более».

дают цепь отправительной антенны замыканием контактного ключа. Так как прием радиотелеграмм в огромном большинстве случаев производится на слух телефоном, то весьма часто на отправительных радиостанциях применяют особые приспособления, вызывающие колебания излучаемой мощности с некоторой слышимой частотой. В таком случае принимаемые на слух телеграфные сигналы (знаки Морзе) получаются в форме более коротких (точки) и более длинных (тире) звуков определенного тона.

Приемная антенна A_2 (фиг. 158) воспринимает доходящую до нее электромагнитную энергию, и за счет этой энергии в ней возбуждаются электрические колебания в форме высокочастотных токов. Для успешного приема радиосигналов цепь приемной антенны также должна быть настроена в резонанс с частотой приходящих радиоволн, т. е. частота собственных электрических колебаний приемной антенны A_2 должна более или менее строго соответствовать частоте колебаний в отправительной антенне A_1 . Все это обычно достигается так называемой настройкой радиоприемника, именно изменением емкости конденсатора, вводимого в цепь приемной антенны A_2 . Так как из всей электромагнитной энергии, излучаемой отправительной антенной, обыкновенно лишь весьма незначительная доля доходит до приемной антенны и воспринимается ею, то возникающие в ней электрические колебания, т. е. высокочастотные переменные токи, оказываются ничтожно слабыми, и для обнаружения их бывает необходимо специальное усиление. По этой причине современные радиоприемники, как общее правило, включают в себе усилительные лампы (см. § 44, гл. 4). При приеме звуковой передачи вместо простых наушных телефонов очень часто применяют громкоговоритель, представляющий собой не что иное, как очень мощный телефон.

На первый взгляд может показаться, что дальность радиосвязи ограничивается условиями прямого видения отправительной и приемной радиостанций и что вследствие шарообразности земли, вообще говоря, мало прозрачной для радиоволн, на больших расстояниях радиосигналы не будут приниматься. Опыт, однако, показывает, что дело обстоит иначе и что радиосвязь возможна даже для точек земной поверхности, наиболее удаленных. Объясняется это тем, что радиоволны на большой высоте, порядка 150 километров от земной поверхности, встречают сильно ионизированный, сравнительно хорошо проводящий слой атмосферы. Достигнув этого слоя, радиоволны отражаются от него, а затем могут отражаться и от земной поверхности. При больших расстояниях возможно многократное повторение подобных отражений, благодаря чему все происходит так, как будто бы радиоволны

огибают земную поверхность. Радиосвязь в настоящее время получила чрезвычайное распространение, заменяя в ряде случаев проволочную связь. Кроме того радиосвязь допускает установку радиостанций на кораблях, на аэропланах и т. п., благодаря чему в значительной степени улучшились условия водного и воздушного транспорта как в смысле безопасности, так и в смысле общих удобств, достигаемых при радиосвязи.

Одним из самых ярких примеров исключительно важного значения радиосвязи является организация и проведение научной экспедиции Папанина, Кренкеля Ширшова и Федорова. Дрейфующая радиостанция «Северный полюс» в течение 9 месяцев регулярно передавала сводки научных наблюдений, сообщала о своем местонахождении и облегчила своевременное снятие советских героев со льдины, отнесшей их на расстояние около 2000 километров от полюса. Радиосвязь сыграла исключительно важную роль и во все время дрейфа корабля «Георгий Седов».

Есть еще одна область, дополняющая телеграфную и телефонную связь. Мы имеем в виду передачу изображений на расстоянии. В самое последнее время в этой области достигнуты значительные успехи. Разработаны и применяются на практике способы электрической передачи разного рода рисунков, фотографий и тому подобных изображений. Благодаря применению радиосвязи удалось разрешить и задачу видения на расстоянии, т. е. передачи изображения живых, подвижных предметов. Не вдаваясь в подробности устройств такого рода, мы в заключение этого последнего параграфа настоящей книги кратко перечислим еще некоторые главнейшие применения электрического тока для целей сигнализации и управления.

В области железнодорожного транспорта электрическая сигнализация имеет очень большое значение, обеспечивая безопасность движения и позволяя надлежащим образом регулировать его. Помимо телеграфной и телефонной связи между станциями отправления и приема поездов применяются особые виды железнодорожной сигнализации для указания свободных и занятых путей и т. п. (световые сигналы разных цветов, электрические звонки). Разработаны специальные, иногда довольно сложные, электрические схемы и аппараты, позволяющие дежурному по станции непрерывно контролировать станционные пути и ближайшие перегоны, а также в соответствии с расписанием поездов управлять движением. Кроме того на больших станциях перевод стрелок обычно производится при помощи электродвигателей, пускаемых в ход в надлежащий момент из центрального поста. То или иное положение стрелки сигнализируется в пост управления путем замыкания электрических контактов.

Электрический перевод стрелок представляет собой при-

мер из области так называемой телемеханики, т. е. управления механизмами на расстоянии. Эта область в настоящее время получила значительное развитие во многих отраслях народного хозяйства. Почти все телемеханические устройства основаны на использовании электрической энергии. В каждом частном случае применяется специальная схема, в состав которой помимо необходимых проводов входят разного рода реле и другие электромагнитные приборы, пускающие в ход машины-орудия, двигатели и т. д., а также полностью управляющие этими механизмами. При помощи такого рода телемеханических устройств из центрального поста управления, путем замыкания соответствующих электрических контактов, можно на расстоянии, иногда весьма значительном, приводить в действие сколь угодно сложные механизмы. Что касается линии связи между центральным постом и управляемыми механизмами, то в этом отношении можно идти двумя путями. В целом ряде случаев задача решается применением простой проволочной связи. Иногда же, в особенности когда управляемые механизмы подвижны, радиосвязь оказывается особенно удобной, а нередко и единственно возможной, например при управлении аэропланом.

В тесной связи с телемеханикой стоит область автоматизации, которая охватывает собой все случаи работы более или менее сложных устройств и механизмов без участия человека. В огромном большинстве случаев автоматические устройства весьма просто осуществляются путем применения электрических схем, содержащих реле и разного рода вспомогательные аппараты. В этом отношении схемы, которыми пользуются в автоматике и в телемеханике, имеют много общего. Но в то время как в телемеханических схемах основные контакты, приводящие в действие механизмы, замыкаются человеком, в автоматических устройствах эти контакты замыкаются в соответствующие моменты времени самим движущимся механизмом или некоторым особым электрическим прибором, так или иначе связанным с рабочими частями устройства. Так, например, существуют автоматически работающие гидроэлектрические станции, в которых все управление станцией, включая регулирование гидравлических турбин и электрических генераторов, происходит само собой путем замыкания контактов, приспособленных к вольтметрам, ваттметрам и другим контролирующим приборам. Пуск в ход таких электростанций производится либо непосредственно ответственным техником, либо при помощи телемеханических устройств, действующих на расстоянии. Для небольших гидростанций автоматическая работа представляет известные экономические преимущества, так как позволяет значительно сократить количество обслуживающего персонала.

В виде второго примера, показывающего, какие широкие возможности открываются при применении автоматики в самых разнообразных областях народного хозяйства, упомянем автоматическую сортировку каких-либо изделий или продуктов, различающихся между собой по цвету. Между прочим так сортируют бобы, автоматически отделяя светлые от темных. Заставляя их падать по наклонному лотку, сильно освещают определенное место лотка. Свет, отражаемый от боба, проходящего по этому месту, направляют на фотоэлемент, играющий роль электрического глаза (см. § 44, гл. 4). В зависимости от того, будет ли боб светлый или темный, электрический ток в цепи фотоэлемента делается сильнее или слабее. Действуя на соответствующие реле, этот ток вызывает замыкание некоторых контактов и таким образом приводит в действие механизм, сбрасывающий с лотка бобы одного определенного цвета. Бобы другого цвета доходят до конца лотка. Примеры возможного применения схем автоматики очень многочисленны. Нет ни одной отрасли тяжелой, легкой и пищевой промышленности, где применение автоматики в той или иной степени не способствовало бы улучшению производственного процесса, ускоряя и удешевляя его. Всмерное использование способов автоматики должно явиться основой дальнейших успехов стахановского движения, широкой волной разлившегося по нашей стране.

Более или менее точное знание времени имеет большое значение как при производстве различных исследований, так и на транспорте, в промышленности и т. д. Мы также нуждаемся в правильном ходе наших часов. Точное время дается астрономическими обсерваториями путем наблюдения за движением небесных тел. В определенные часы суток точное время сообщается во всеобщее сведение при помощи особых радиосигналов. Кроме этой так называемой точной службы времени, обеспечивающей в первую очередь интересы научных работ, обычно теми или другими способами осуществляют общую службу времени, которая имеет задачей доводить время до широкого потребителя с достаточной для практики точностью. В этом отношении в современных условиях чаще всего поступают следующим образом. На заводе, в учреждении или в районе устанавливают центральные часы (маятниковые) повышенного качества, периодически проверяемые по радиосигналам точной службы времени. Эти часы снабжаются контактными приспособлениями, замыкающими цепь электрического тока ежесекундно или ежеминутно. В тех местах, где требуется указание времени, ставятся вторичные часы, приводимые в движение импульсами¹ (посылками) тока от центральных часов. Вторичные импульсные часы снабжены электро-

магнитным механизмом, переводящим стрелки часов на секунду или на минуту при каждой посылке тока.

Другой весьма простой способ приведения в движение вторичных часов заключается в использовании распределительных сетей, питаемых от генераторных станций переменного тока. На станции устанавливаются точные главные часы, проверяемые по радиосигналам времени. Все вторичные часы, присоединяемые по всему району непосредственно к сети переменного тока, например, через штепсели, приводятся во вращение очень небольшими синхронными электродвигателями (см. § 65, гл. 8), помещаемыми в этих часах, называемых синхронными часами. Подобные же синхронные часы, иногда более сложного устройства, устанавливаются и на электрической станции для сравнения с главными часами. Надлежащим регулированием частоты переменного тока можно добиться того, что все синхронные часы, приключенные к данной сети, идут достаточно точно по сравнению с главными часами, установленными на станции. Применение синхронных часов требует удовлетворительного поддержания определенной частоты переменного тока. К этому же должно стремиться современное электроэнергетическое хозяйство и само по себе, так как постоянство частоты имеет значение для ряда отраслей промышленности, пользующихся синхронными двигателями для приведения во вращение рабочих механизмов.

Наконец, упомянем еще о пожарной сигнализации, назначение которой заключается в быстром оповещении пожарных команд о начавшемся пожаре, с указанием места вызова о помощи. Самостоятельная сеть электрической пожарной сигнализации обычно соединяет со зданием пожарной команды особые пожарные кнопки, устанавливаемые в различных местах городского района, в заводских и общественных зданиях, а также в жилых домах. В случае пожара лицо, обнаружившее его, подходит к ближайшей пожарной кнопке, разбивает стекло, за которым эта кнопка установлена, и нажимает ее. Тотчас же в помещении пожарной команды раздается электрический звонок, и особый прибор указывает место, откуда последовал вызов. Электрическая пожарная сигнализация является, совершенно необходимым устройством во всяком городе, во всяком фабрично-заводском предприятии.

¹ Латинское слово «импульс» обозначает «толчок», «удар».

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Автоматика 305
Аккумулятор 94, 290
Алюминиевая промышленность 287
Алюминиевый выпрямитель 289
Ампер 97
Ампервитки 128
Амперметр 138
Ампер-секунда 97
Ампер-час 98
Амплитуда тока 158
Анод 113
Антенна 300
Асинхронный двигатель 254
Атом 57
Атомно-водородная сварка 280
Атомное ядро 58

Б

Барабанная обмотка 182
Барабанный якорь 181
Батарея 106
Бенардос 278
Буквопечатающий телеграфный аппарат 297
Бумажный конденсатор 52
Быстродействующее реле 200

В

Вакуум 123
Вакуумная трубка 124
Ватт 143
Ваттметр 145
Ввод 225
Вебер 73
Взаимная индукция 154
Вихревое движение 70
Вихревые токи 169
Внутриатомная энергия 59
Возбуждение компаунд 187
Воздушные линии передачи 212
Вольт 39, 98, 148
Вольт-ампер 143

Вольтметр 40, 133
Вольтова дуга 122, 244
Вольфрамовая лампа 242
Вращающееся магнитное поле 176
Встречное включение 224
Вторичный элемент 94

Г

Газовые ионы 119
Газополная лампа 242
Газосветная лампа 249
Гальвани 93
Гальванический элемент 93
Гальванометр 136
Гальванопластика 288
Гальваноскоп 135
Гальванотехника 287
Гаусс 77
Генератор 85
Герц 159
Гидравлическая энергия 20
Гидравлический двигатель 20
Гидроэлектрическая станция 201
Градуировка гальванометра 137
Грамм 179
Грамма кольцо 179
Громоотвод 121
Групповой привод 262

Д

Двигатель с белчиным колесом 257
Двухполюсная машина 184
Действующее значение 165
Деполаризатор 118
Джоулево тепло 111
Джоуль 111, 141
Дизель 197
Дина 12
Динамомашиня 93
Диссоциация 113
Диэлектрик 55
Диэлектрическая проницаемость 55
Длина волны 302
Добавочное сопротивление 139

Добавочный полюс 187
 Доливо-Добровольский М. О. 204
 Дуговая печь 282
 — электросварка 278

Е

Единая высоковольтная сеть 208
 Единичный магнитный полюс 63
 Емкость 49
 — аккумулятора 118

Ж

Железные потери 169
 Железо-никелевый аккумулятор 118
 Жила 219

З

Заземление 209
 Заземленные тросы 216
 Закон Джоуля 111
 — Ленца 134
 — магнитной цепи 129
 — сохранения энергии 15
 — электромагнитной индукции 147
 Закрытая подстанция 228
 Заряд 32
 Земное магнитное поле 67
 Зубчатый якорь 182

И

Изолятор 32, 213
 Изоляционные трубки 223
 Индуктивность 152
 Индуктированная электродвижущая сила 98
 Индуктированный ток 83
 Индукционная катушка 155
 Индукционные печи 281
 Индукционный двигатель 256
 Индукция 76
 Инерция 11
 Ионизация газа 119
 Ионы 90, 113
 Искра 121

К

Кабель 219
 Катод 113
 Катушка Румкорфа 156
 Килограмм 12
 Килограммометр 12
 Кинетическая энергия 15
 Колебательный разряд 164

Количество электричества 34
 Коллектор 180
 Коллекторный двигатель переменного тока 260
 Кольцевой якорь 179
 Коммутатор 180
 Коммутация 179, 183
 Компас 67
 Компенсация индуктивности 163
 Конденсатор 49
 Кондиционирование 273
 Контакт 51
 Контактная электросварка 280
 Контактные кольца 189
 Корона 121, 213
 Коэффициент мощности 166
 — трансформации 168
 Кулон 35, 97
 Кулона закон 35

Л

Ламповый генератор 302
 Ламповый патрон 243
 Лейденская банка 50
 Лекланше элемент 118
 Линия передачи 86, 205
 — электрической передачи 205
 Лифт 272
 Лобовые соединения 193
 Лошадиная сила 142
 Лучистая энергия 21
 Люкс 238
 Люксметр 210

М

Магнит 60
 Магнетизм 61
 Магнитная индукция 76
 — линия 69
 — проницаемость 78
 — сила 79
 — сталь 65
 — цепь 128
 Магнитное поле 66
 — сопротивление 129
 Магнитный полюс 61
 — поток 72
 — спектр 67
 — тока 86
 Магнито-электрический прибор 139
 Максвелл 57, 72
 Масляный выключатель 199
 Массовые пластины 291
 Мачтовая подстанция 226
 Мгновенное значение переменной величины 159
 Мембрана 299

Механическая сила 11
 Микроскоп 16
 Микрофон 298
 Многополюсная машина 184
 Молния 121
 Морзе приемник 296
 Моторный вагон 266
 Мощность 142
 Мощность трехфазного тока 175

Н

Наведенное электричество 43
 Нагревательное устройство 112
 Нагрузка голых проводов 221
 Намагничивание через влияние 64
 Направление магнитной линии 69
 — — силы 80
 — электрического поля 56
 Напряжение 37
 — линии передачи 210
 Нейтрон 59
 Непрерывность магнитного потока 73
 Неустановившийся режим 165
 Низкое напряжение 205
 Нормальное сечение проводов 212
 Нулевой провод 206

О

Образцовая лампа 237
 Обратимость динамомашин 135
 Одиночный привод 263
 Однофазный генератор 189
 Однофазный ток 170
 Одноякорный преобразователь 229
 Ом 100
 Ома закон 102
 Опора воздушных линий передачи 214
 Освещение 241
 Освещенность 237
 Открытая подстанция 226

П

Падение напряжения 99
 Пазы якоря 183
 Параллельная работа нескольких станций 207
 Параллельное соединение 107
 Первичный элемент 118
 Переменный ток 92, 157, 165
 Перенапряжение 218
 Период 25, 158
 Петров В. В. 244
 Печь Геру 282
 — сопротивления 275

Питательный пункт 222
 Плавкие предохранители 112
 Пламенная дуга 247
 Плоский очиститель газов 293
 Поверхностные пластины 291
 Подвесной изолятор 213
 Подстанции 225
 Пожарная сигнализация 307
 Полюсные башмаки 192
 Поляризация 116
 Понижительная подстанция 205
 Последовательное соединение 104
 Постоянный магнит 65
 — ток 92
 Потенциал 36
 Потенциальная энергия 20
 Потери на токи Фуко 169
 Поток самоиндукции 151
 Правило левой руки 132
 — правой руки 91
 — штыря 87
 Преобразовательная подстанция 228
 Прерыватель 156
 Приемник электрической энергии 85
 Провода воздушной линии 213
 Проводник 33
 Проектор 240
 Протон 59
 Проходной изолятор 201
 Пусковой реостат 252
 Пустотная лампа 242
 Пылесос 274

Р

Работа механическая 11
 — электрического тока 141
 Радиосвязь 300
 Радиотехника 25
 Развертка 193
 Разность фаз 162
 Разомкнутая сеть 221
 Разряд электрический 52
 Разрядники 217
 Разъединитель 227
 Распределительная сеть 108, 205
 Распределительное устройство 199
 Распределительный щит 200
 Реакция химическая 19
 — — якоря 187
 Регулирование расхода воды 202
 Регулятор 188
 — вольтовой дуги 245
 Резонанс 164
 Реостат 105
 Ротор 191

Ртутная дуга 247
Ртутный выпрямитель 230

С

Самовозбуждение машины 185
Самоиנדукция 149
Свеча 237
Свинцовый аккумулятор 117
Свободное электричество 42
Связанное электричество 12
Серийное возбуждение 186
Сигнализация 294
Сила света 237
— тока 97
Синхронизация 200
Синхронная машина 201
— скорость 253
Синхронный двигатель 253
— конденсатор 261
Скольжение 259
Скользкий контакт 105
Славянов Н. Г. 279
Служба времени 306
Смещение щеток 183
Смоляное электричество 31
Соединение звездой 172
— треугольником 173
Средняя мощность 166
Стале-алюминиевый провод 213
Статор 191
Стеклоанное электричество 31
Степень диссоциации 114
Сухой элемент 119
Схема 104

Т

Телеграф 295
Телемеханика 305
Телефон 298
Телефонная станция 299
Тепловая энергия 16
Тепловой прибор 140
Термоэлектрический ток 95
Термоэлектродвижущая сила 98
Термоэлемент 95
Тихий разряд 120
Тлеющий разряд 121
Токи Фуко 169
Точечная сварка 281
Трансформатор 155
Трансформаторное масло 201
Трансформаторный пункт 205
Трехфазный генератор 190
— двигатель 176
— ток 170
Троллей 269
Троллейбус 270

Трубчатый очиститель газов 232
Турбогенератор 193

У

Угольная лампа 242
— щетка 183
Уравновешенная трехфазная система 175
Установившийся режим 164

Ф

Фаза 162
Фазный угол 162
Фарада 50
Фарадей 50
Фарадея закон электролиза 116
Фарфоровые ролики 223
Фен 274
Ферромагнитный материал 66
Фидер 222
Формование пластин 291
Фотометр 238
Фотоэлемент 125
Фуко 169

Х

Химическая энергия 18
Химия 18

Ц

Цепь электрического тока 83
Цоколь 242

Ч

Частота 159
— генератора 191

Ш

Шины 199
Шнур 223
Штыревой изолятор 213
Шунт 138
Шунтовое возбуждение 186

Э

Эбонит 47
Электризация через влияние 41
Электрическая дуга 284
— печь 123
— проводимость газов 120
— сварка 123
— свеча Яблочкова 244
— сеть 108
— сила 56

Электрическая станция 195
— тяга 265
— цепь 84
— энергия 24
Электрический звонок 294
— потенциал 36
— разряд 120
— счетчик 146
— ток 26, 83
— утюг 277
Электрическое поле 53
— сопротивление 100
Электричество 27
Электровоз 266
Электрод 51, 94
Электродвигатель переменного то-
ка 252
— постоянного тока 250
Электродвижущая сила (э. д. с.)
98
— — самоиндукции 150
Электродинамический прибор 140
Электродинамическое взаимодей-
ствие 133
Электролиз 113
— воды 115
Электролит 112
Электролитическая очистка меди
286
Электролитический конденсатор
289
Электромагнит 126
Электромагнитная индукция тока
83

Электромагнитная связь 155
— энергия 24, 81
Электромагнитные колебания 25, 81
Электромагнитный генератор 92
— механизм 127
— прибор 140
Электрон 58
Электронагревательное устройство
275
Электронная лампа 124
Электронный выпрямитель 125
Электроочиститель 292
Электросварка 278
Электроскоп 29
Электростатика 27
Электростатический вольтметр 11
140
Электротехника 33
Электротрактор 272
Электрофор 45
Электрофорные машины 47
Энергия 14
— магнитного поля 81
— электрического поля 56
— — тока 84
Эрстед 79
Эфир 24

Я

Якоби Б. С. 288
Якорь генератора 179
— электромагнита 127
Янтарь 27

Цена в переплете 17 руб.