





Энциклопедический  
СЛОВАРЬ

7е Издание  
Русского Библиографического  
Института "Транзит"



Энциклопедический  
СЛОВАРЬ

7<sup>e</sup> Издание  
Русского Библиографического  
Института "Гранат"



# ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ <sup>7<sup>e</sup></sup> переработан. издание

ПОД РЕДАК: (до 3 тома) ПРОФ. В. Я. ЖЕЛЕЗНОВА,  
М. М. КОВАЛЕВСКОГО, С. А. МУРОМЦЕВА, К. А. ТИМИРЯЗЕВА.



А. ПАСТЕРНАК



из книг  
сергея и елены  
москалевых

# ЭНЦИКЛОПЕДИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

РУССКОГО БИБЛИОГРАФИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ГРАНАТ.

СЕДЬМОЕ ИЗДАНИЕ

ДО 33-го ТОМА ПОД РЕДАКЦИЕЙ

проф. Ю. С. Гамбарова, проф. В. Я. Железнова, проф. М. М. Ковалевского, проф. С. А. Муромцева и проф. К. А. Тимирязева.

---

Том пятьдесят второй.

Электрические звонки — Электротехника

*Lexicographis secundus post Herculem labor.*  
(Скализгер).

Главлит № В-60088.  
Сдано в набор 10/VI 1984 г.

Тираж 7500—20<sup>1</sup>/<sub>4</sub> л.  
Заг. № 2720.

Форм. бум. 62×94  
Подп. к печ. 26/XII 1984 г.

---

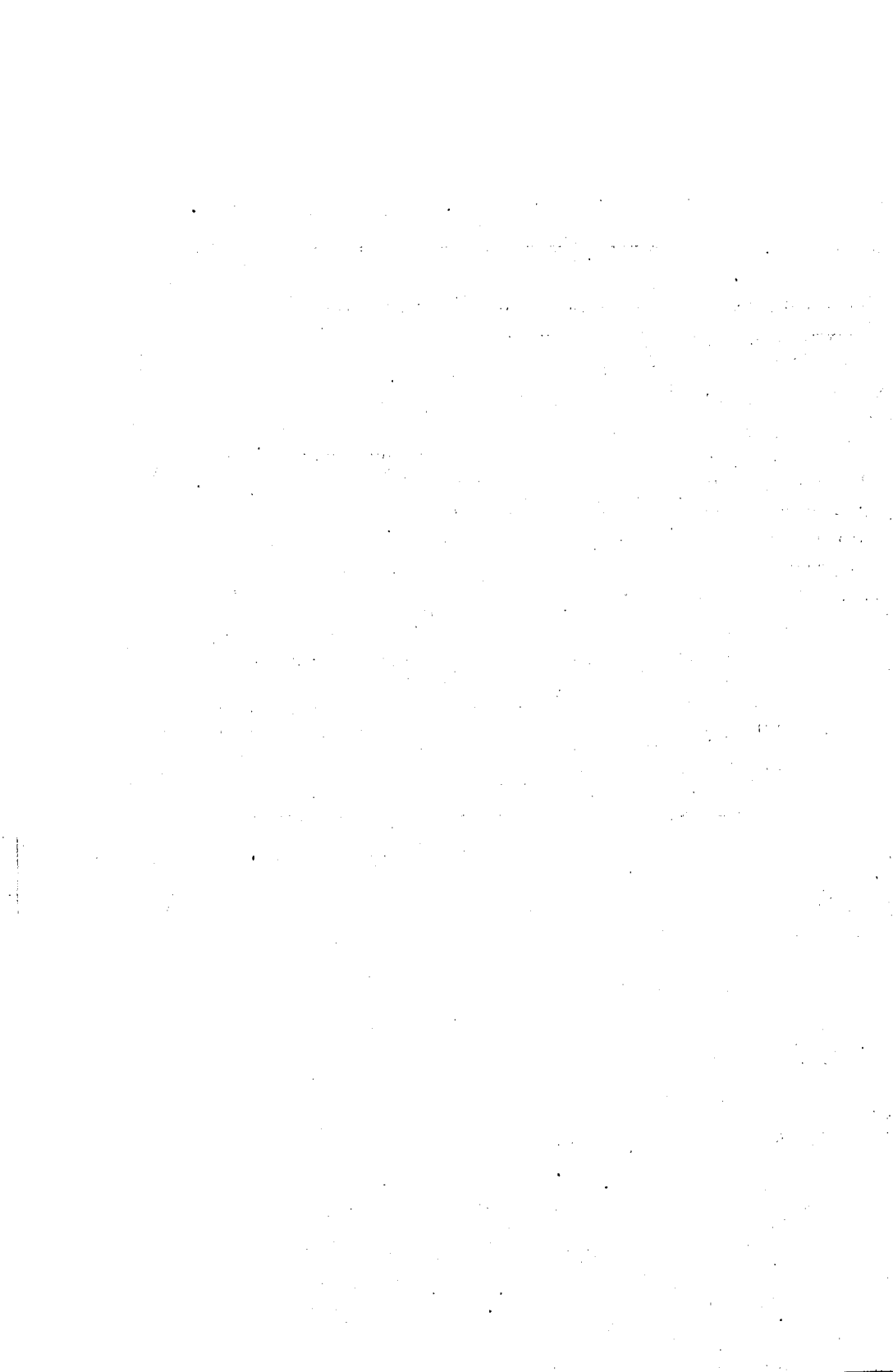
Типография ЛСПО им. т. Чудова, Ленинград, Лештуков, 13.



**Важнейшие статьи в томе:**

Столб.

Электрические музыкальные инструменты— <i>П. Н. Зимина</i> . . . . .	1
Электричество—проф. <i>Я. И. Френкеля</i>	
Содержание статьи:	
гл. I. Электростатика . . . . .	9
„ II. Электрический ток . . . . .	48
„ III. Электромагнитные явления и магнетизм . . . . .	86
„ IV. Электромагнитные волны и электромагнитная теория света .	130
Электронная лампа—проф. <i>В. И. Баженова</i> . . . . .	171
Электронная теория—проф. <i>О. Д. Хвольсона</i> . . . . .	192
Электротерапия— <i>И. Я. Раздольского</i> . . . . .	212
Электротехника (цикл статей) . . . . .	225
I. Теоретические основы электротехники— <i>Е. В. Нитусова</i> . . . . .	226
II. Электрические измерения— <i>А. С. Касаткина</i> . . . . .	316
III. Электротехнические материалы—проф. <i>Ю. С. Чечета</i> . . . . .	339
IV. Электрические машины—проф. <i>Ю. С. Чечета</i> . . . . .	348
V. Электрические станции—проф. <i>С. А. Кукель-Краевского</i> . . . . .	499
VI. Теплоэлектроцентрали—проф. <i>С. А. Кукель-Краевского</i> . . . . .	546
VII. Коммутация электрических станций и выбор аппаратуры— <i>М. Ф. Полякова</i> . . . . .	559
VIII. Передача электрической энергии—проф. <i>С. А. Кукель-         Краевского</i> . . . . .	594
IX. Электрические железные дороги— <i>А. Г. Галинова</i> . . . . .	621



# ТОМ ПЯТЬДЕСЯТ ВТОРОЙ

Электрические звонки — Электротехника.



# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЗВОНКИ.

**Электрические звонки**, см. *электротехника—сигнализация*.

**Электрические измерения и единицы**, см. *электротехника*, гл. 2; ср. *электричество*.

**Электрические колебания**, см. *электричество*.

**Электрические музыкальные инструменты**. Использование электрических сил для воспроизведения музыкальных звуков начало привлекать к себе внимание изобретателей и конструкторов еще в первой половине XVIII ст. В 1730 г. моравский священник Прокопий Дивич построил „Denis d'or“ (Золотой Дионис)—электрическое фортепиано (?) с разнообразными изменениями звука, имевшее 790 струн и могущее давать до 130 оттенков звука, подражая всем струнным и духовым музыкальным инструментам. Несмотря на сложность устройства, „Золотой Дионис“ мог быть настроен в  $\frac{3}{4}$  часа. Особое устройство, управлявшееся изобретателем, позволяло по его желанию давать удар электрического тока. Инструмент был построен в единственном экземпляре и в настоящее время не

существует. Второй попыткой Э. м. и. является „clavessin électrique“ (электрический клавиесин) P. de-Labord'a, построенный в 1759 г. На железном стержне, подвешенном на шелковых нитях и соприкасавшемся с электростатической машиной, висели на железных проволоках колокольчики, настроенные хроматически. Второй комплект колокольчиков, настроенных в унисон с предыдущей серией, был подвешен к тому же стержню на шелковых нитях, будучи соединен цепочками с железными кольцами, в которые входили железные рычажки. Между парами колокольчиков висели на шелковых нитях железные шарики. При нажатии клавиш железные рычажки, лежащие в кольцах, прикасались к заземленному железному стержню, благодаря чему электрический заряд с колокольчиков, подвешенных на шелковых нитях, мог сте-

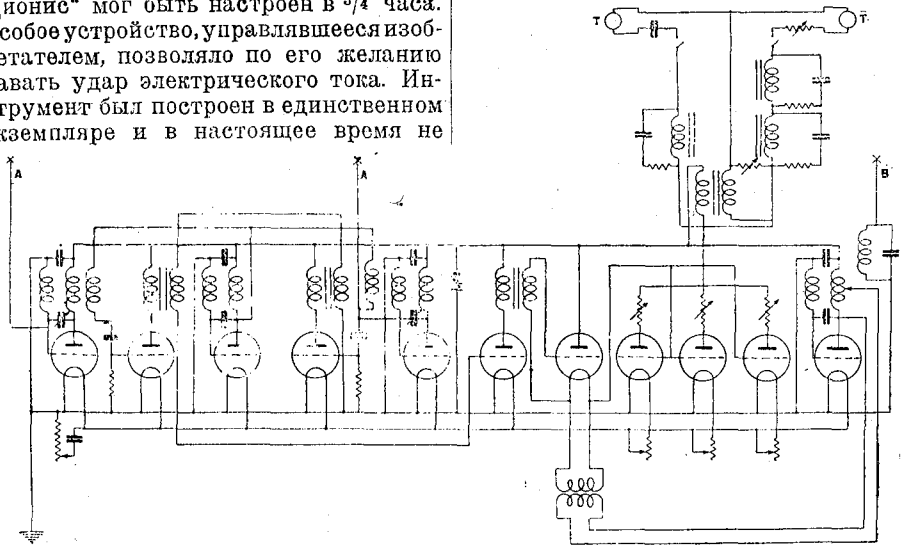


Рис. 1. Двухголосный „термевокс“. А—антенна для управления; В—антенна для управления силой звука; Т—громкоговоритель.

кать в землю. Вследствие этого всякие между колокольчиками шарики притягивались к ним попеременно, начинали быстро вибрировать, ударяя с большой частотой в колокольчики и давая звуки, похожие на звуки органного регистра „tremulant“ (выбрирующие звуки).

Развитие электротехники во второй половине XIX ст. побудило к возобновлению применения электрических сил в музыкальных инструментах. Многочисленные изобретения Э. м. и., в особенности обильные за последнее десятилетие в связи с развитием радио-

ную возможностями богатых и разнообразных сочетаний тембров. Что касается фортепиано, то в 1827 г. Вауерисхе Telephonwerken А. Г. патентовало рояль с электромагнитным механизмом, приводившим в быструю вибрацию молотки, ударявшие по струнам с большой частотой и дающие незатухающие звуки.

б) Инструменты с электрическим или электромагнитным возбуждением звучащих тел, а также с усилением и передачей на расстояние колебаний этих звучащих тел; последние применяются обычных употребительных в

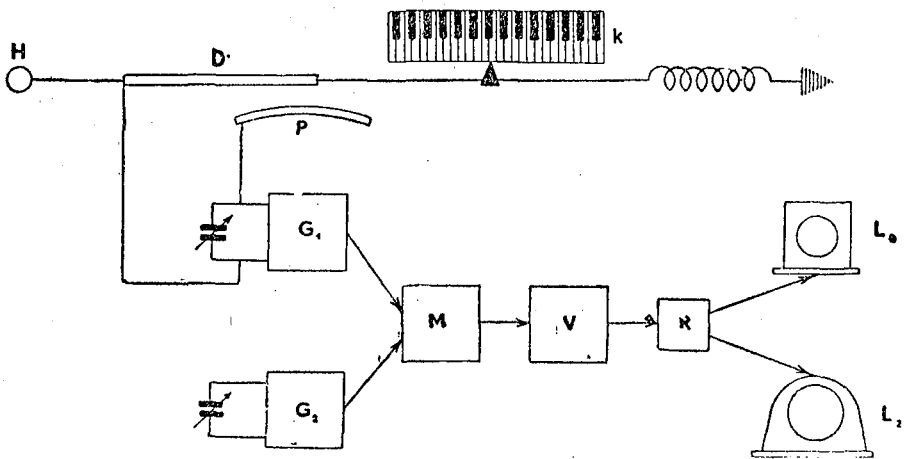


Рис. 2. Схема „ферофона“ Мартено.  $G_1$  и  $G_2$ —генераторы высокой частоты;  $M$ —детектор;  $V$ —усилитель низкой частоты;  $R$ —регулятор силы звука;  $D$  и  $P$ —регуляторы высоты звука;  $L_1$  и  $L_2$ —громкоговорители;  $k$ —клавиатура.

техники, можно разделить на три основных типа:

а) Инструменты, в которых электричество применяется в качестве вспомогательной движущей силы. В связи с усовершенствованием электромоторов малых мощностей, их начали применять для приведения в действие мехов органов, гармониумов, оркестрионов (с 1896 г.), автоматических фортепиано и т. п. Кроме того, в современных органах, начиная с 1867 г., применяется передача движения от клавиш и регистровых рычагов к звучащим трубам и клапанам, управляющим действием органа, с полным или частичным применением электричества (электрическая и электропневматическая трактура), что дает органисту большие удобства при игре и обогащает послед-

музыкальных инструментах типов. Сюда относятся прежде всего многочисленные электрические фортепиано, звуки струн которых возбуждались или усиливались посредством электромагнитов (H. I. Gauntlett, 1852 г.; I. W. Goundry—1863 г.; M. A. F. Menons—1866 г.; I. C. Ward—1876 г.; A. Ghiglione—1887 г.; R. Eisenmann—1889 г.; P. E. Singer—1892 г.; W. K. L. Dickson—1903 г.; I. Weber—1905 г.; „Choralcelo“—M. L. Severy и G. B. Sinclair—1909 г.; Lyrachord O°—1912 г.; Gaveaux—1926 г.; Горин—1928 г.; O. Vierling—1929 г.; Nernst—1931 г.; „Elektrochord“—A. Förster—1932 г.). В одном из самых совершенных инструментов этого рода—электро-рояле Nernst'a, построенном фирмами Bechstein и Siemens, не имеется обычной для

фортепиано резонансной деки; колебания струн, возбуждаемых посредством нормальной молоточковой механики, воспринимаются электромагнитными микрофонами, возникающие в которых токи усиливаются электронными лампами и реализуются в звуки в динамическом репродукторе (громкоговорителе). Поворотом рычага можно дать любую степень усиления звука, начиная от еле слышных звуков спинета вплоть до мощности большого концертного рояля при относительно хорошем сохранении тембра фортепиано. Кроме того, благодаря тому, что струны ко-

Березняка в московском радиоузле в 1931 г. по передаче звуков смычковых инструментов, гитары и рояля). К этой же последней категории Э. м. и. относится по существу и электрограммофон, преобразующий механические колебания иглы воспринимающего механизма, проходящей по извилинам звуковой записи, в электромагнитные колебания, усиливаемые электронными лампами и реализуемые в звуки в громкоговорителе.

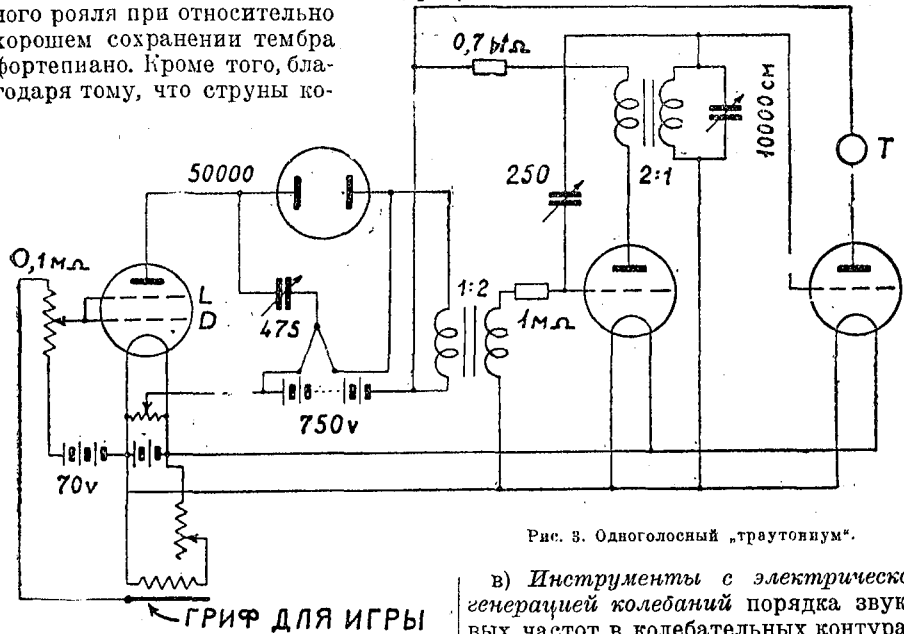


Рис. 3. Одноголосный „траутовнум“.

леблются более свободно и не отдают значительной части своей энергии резонансной деке, продолжительность звуков почти утраивается. В 1897 г. Th. Cahill (Нью-Йорк) в сотрудничестве с R. A. Sloan'ом опубликовал проект Э. м. и. с звучащими пластинками; в 1931 г. известный немецкий изобретатель Jörg Mager применил электрическое усиление звука оркестровых колоколов в Байрейтском театре в опере „Парсифаль“ Р. Вагнера. Кроме того, в последние годы в различных радиовещательных учреждениях производились опыты по электрическому восприятию звуковых и механических колебаний различных музыкальных инструментов, в целях непосредственной передачи их по радио (напр., опыты

в) Инструменты с электрической генерацией колебаний порядка звуковых частот в колебательных контурах, без применения звучащих тел обычных употребляемых в музыке типов. Первым Э. м. и. этого рода является „телегармоний“ Th. Cahill'a, построенный в 1905 г. Он состоял из свыше 150 шт. альтернаторов однофазного тока, дающих частоты употребительного в музыке диапазона; токи от альтернаторов через нажатие клавиш посылались в сеть громкоговорящих телефонов или поющих вольтовых дуг. В инструменте имелись сложные приспособления для искусственного подмешивания к колебаниям основного периода гармонии в любых сочетаниях для получения разнообразных тембров. Телегармоний явился сложным, громоздким и очень дорогим прибором и с изобретением электронных способов

возбуждения колебаний был ликвидирован. Открытие изобретателем электронной лампы Lee de Forest'ом в 1912 г. возможности получения с ее помощью колебаний порядка музыкальных частот положило начало многочисленным новейшим Э. м. и. В 1917 г. на радио-станции Эйфелевой башни (Париж) были сделаны опыты передачи музыкальных звуков путем использования биений, возникающих при генерации в колебательном контуре. Этот же принцип использовал в своем Э. м. и. „радиола“ Аникин (1927) и Брон-

стей, входящих в колебательный контур, путем вращения рукоятки переменного конденсатора или, что более удобно, посредством клавишного механизма, переключающего серии конденсаторов и самоиндукций, либо посредством особого игрового „грифа“. Очень удачным оказалось применение гетеродинамных схем, состоящих из двух колебательных контуров порядка 100—200 тысяч колебаний в секунду, из коих настройка одного контура могла быть произвольно изменяема в пределах нескольких тысяч колебаний в секунду.

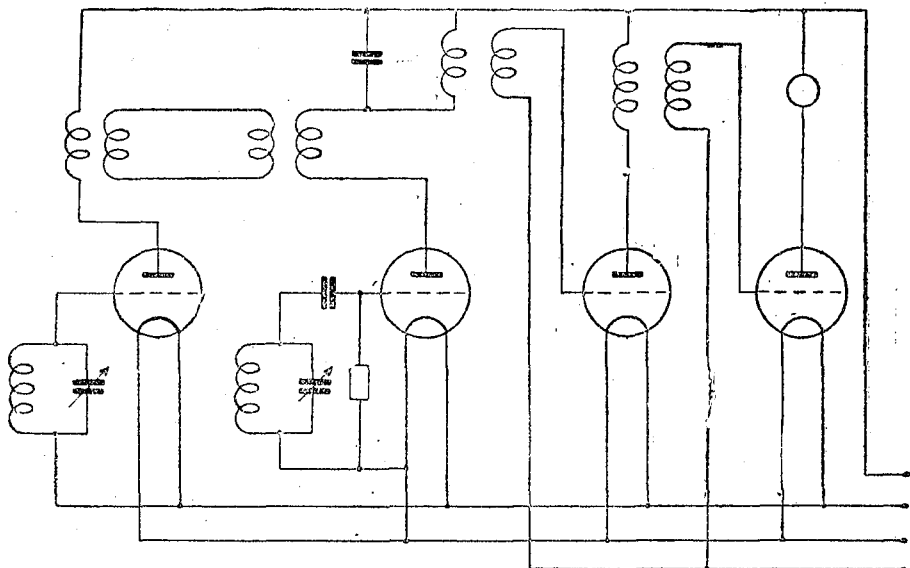


Рис. 4. „Сферофон“ Марепа.

штейн (1928). Малая устойчивость высоты тона подобных Э. м. и. и неудобство управления ими заставили от них отказаться и применить Э. м. и., построенные на принципе непосредственного генерирования звуковых частот в колебательных контурах. Приборы этого типа довольно многочисленны (Hugoniot—1922 г.; „катодный гармоний“ Ржевкина—1922 г.; Гуров—1922 г.; Bertrand—1928 г.; „Orgue électrique“ Coupleux-Givelet—1925 г.; сферофон Jörg Mager—1925-26 г.; Gernsbeck—1926 г.; Джунковский; „электрола“ Бронштейна—1929 г.; „emicon“—Pratt, Read and Co—1932 г.). Изменение высоты звука в таких Э. м. и. достигается большей частью изменением емко-

Взаимодействие между этими контурами создает разностный комбинационный тон, реализуемый в громкоговорящем в форме музыкального звука. Самым известным Э. м. и. этого типа является „терменвокс“, изобретенный в 1921 г. ленинградским инженером Терменом. Изменение настройки одного из колебательных контуров „терменвокса“ достигается путем большего или меньшего приближения руки играющего (или вообще проводника электротока) к небольшой антенне, укрепленной на ящике с прибором (см. *электричество*, ЛЦ, 159). Особые приспособления позволяют регулировать силу звука и его тембр, а также получать различные штрихи (legato, staccato и т. п.).



Другие Э. м. и. этого типа имеют специальный „гриф“ или клавиатуру для игры („сферофон“ Martenot—1925 г.; „helertion“ Helberger'a и Lertes'a—1926 г.; „сонар“ Ананьева—1929 г.; „ondium“ Pechadre—1931 г.). В „trautonium'e“ (Trautwein—1927 г.) использован принцип регулировки напряжения, подаваемого на сетку генераторной лампы. Особое место среди Э. м. и. занимают фотоэлектрические м. и. („superpiano“ E. Spielmann—1926 г.; A. Schmalz—1929 г.; „poly-rhythmophon“ H. Cowell—1932 г.). В этих Э. м. и. особый мотор вращает непрозрачные диски с отверстиями, бросающие проблески света на фотоэлемент или на кинофильм (прибор Шолю и Римского-Корсакова, 1932 г.). В последнем приборе готовая фильма пропускается через проектор звукового кино; вызываемые в фотоэлементе последнего переменным освещением электрические токи подвергаются затем дальнейшему усилению и репродукции в громкоговорителе.

Все перечисленные новейшие Э. м. и., за исключением электрографмофона, существуют большей частью пока в единичных экземплярах или в виде лабораторных моделей. Сравнительная трудность игры и управления качеством звука, а также неспособность большинства из них к многоголосию не дали им возможности широко внедриться в современную музыку. Говорить о роли их в музыке поэтому пока преждевременно.

Литература: „Electrical World“ vol. 47, стр. 519, и vol. 48, стр. 637; „Der Anbruch-Musik und Maschine“, октябрь-ноябрь, 1926; „Die Musik—XX Jahrg.“, стр. 42; Schneider, „Ein neues elektromechanisches Musikinstrument“ (Opel A. G. i. Trautwein, „Elektrische Musik“ (Berlin, 1930); R. Whitworth, „The electric Organ“ (London, 1931); С. Н. Броумейн, „Термовакуум и электрола“ (Москва, 1930); O. Verling, „Elektrische Musik“ (B. T. Z., 1932, №7); „Die Musik—XXIV Jahrg.“, август: „La Revue musicale“, 1932/IX—X; „Musical Opinion“, 1932/XII; „Musique et instruments“ (1932) и др.

И. Зыкин.

**Электрическое освещение**, см. *электротехника*.

**Электричество**. Глава I. *Электростатика*. § 1. *Основные факты и понятия* (электрический заряд, напряженность поля, потенциал). Понятие „электричество“ связано с представлением об особом роде сил, которые

появляются между двумя телами, если привести их путем надлежащего воздействия, напр. путем трения друг о друга, в некоторое отличное от обычного „наэлектризованное“ состояние. При этом под Э. понимается то свойство обоих тел, от которого зависят эти силы.

Классические исследования Кулона (конец XVIII века) показали, что это свойство, называемое обычно *электрическим зарядом*, аналогично массе тел, т. е. тому свойству, от которого зависит их взаимное притяжение по закону Ньютона (см. *тяготение*). Сходство между зарядом и массой заключается в том, что соответствующие силы—электрические и гравитационные—одинаковым образом зависят от положения взаимодействующих тел; если размеры последних малы в сравнении с расстоянием между ними, т. е. если их можно трактовать как „материальные точки“ или как „точечные заряды“, то в обоих случаях сила взаимодействия с увеличением расстояния убывает обратно пропорционально его квадрату, при чем направлена она вдоль прямой, соединяющей соответствующие частицы. Что касается различий между зарядом и массой, то в основе своей они сводятся к существованию *двух родов электрических зарядов с противоположными свойствами*, при чем заряды разного рода взаимно притягиваются, а заряды одного и того же рода взаимно отталкиваются. Т. обр. ньютоновское притяжение вполне аналогично лишь взаимодействию разнородных электрических зарядов. Заметим, что электрические силы могут достигать (и обычно достигают) несравненно большей величины, чем гравитационные силы, и потому гораздо отчетливее обнаруживаются и легче измеряются, нежели последние.

Подобно тому, как масса (см.) тела может быть определена по величине силы притяжения, которую оно оказывает на какое-нибудь другое тело (или испытывает со стороны последнего),—электрический заряд тела может быть определен по силе притяжения или отталкивания, производимого им на электрический заряд другого тела. Считая заряд пропорциональным ока-

зывается или испытываемой им электрической силе, можно выразить закон Кулона, характеризующий силу взаимодействия  $f_{AB}$  между двумя наэлектризованными телами  $A$  и  $B$ , в форме, совершенно аналогичной обычной формулировке закона Ньютона:

$$f_{AB} = c \frac{e_A \cdot e_B}{r_{AB}^2}. \quad (1)$$

Здесь  $e_A$  и  $e_B$  обозначают заряды обоих тел,  $r_{AB}$  — расстояние между ними (которое предполагается весьма большим в сравнении с их линейными размерами), а  $c$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц. Обычно полагают  $c=1$ . При этом единица электрического заряда определяется как такой заряд, который на равный ему заряд, находящийся на единице расстояния, действует с единицей силы. Далее, зарядам противоположного рода приписываются противоположные знаки (+, -); при этом условии для силы отталкивания между двумя однородными („одноименными“) зарядами по формуле (1) получается положительный знак, а для силы притяжения между разнородными (разноименными) зарядами — отрицательный знак.

Величина

$$E_{AB} = \frac{e_A}{r_{AB}^2}, \quad (2)$$

равная силе, производимой зарядом тела  $A$  на единицу положительного заряда, помещенную в точке  $B$ , называется *электрической напряженностью*<sup>1)</sup> в точке  $B$ . Сила  $f_{AB}$ , действующая на тело  $B$ , получается при этом умножением напряженности  $E_{AB}$  на заряд  $e_B$ . Это соотношение между силой и напряженностью сохраняется для любого *электрического поля*, т. е. пространства, в котором действуют электрические силы, зависящие от любого распределения электрических зарядов. Рассматривая силу, действующую в точке  $P$  на заряд  $e$ , как *направленную величину*, т. е. как *вектор*  $\vec{f}$ , мы получаем для напряженности электрического поля в этой точке также векто-

риальную величину  $\vec{E}$ , связанную с силой соотношением

$$\vec{f} = e \vec{E}. \quad (3)$$

В случае положительного заряда ( $e > 0$ ) сила имеет направление, совпадающее с напряженностью, а в случае отрицательного заряда ( $e < 0$ ) — ему противоположное. Это значит, что в одном и том же месте заряды разного рода (противоположного знака) испытывают противоположно направленные силы.

Рассматриваемые нами электрические силы называются *электростатическими*, так как они зависят — помимо величины соответствующих зарядов — исключительно от их (относительного) *положения*. Закон Кулона относится лишь к тому случаю, когда эти положения остаются неизменными или меняются очень медленно. Мы увидим ниже, что в случае движущихся зарядов к кулоновым электростатическим силам присоединяются силы *электрокинетические*, зависящие не только от положения зарядов, но также от их скорости и ускорения. Далее мы увидим, что все эти силы передаются от одной частицы к другой не мгновенно, а с конечной скоростью, равной скорости света. Последнее обстоятельство не играет роли в том случае, если рассматриваемые частицы неподвижны или движутся достаточно медленно.

В пределах применимости закона Кулона электрические силы, подобно силам тяготения, обладают консервативным характером. Последний выражается в существовании *потенциальной энергии*, т. е. определенной функции относительных положений (расстояний) всех рассматриваемых частиц, уменьшением которой определяется работа, совершаемая силами взаимодействия при переходе от одного расположения к другому (см. XXXIV, 358/59). Существование подобной функции означает независимость этой работы от промежуточных расположений или, как говорится, от пути перехода.

В простейшем случае двух частиц с зарядами  $e_A$  и  $e_B$  потенциальная энер-

<sup>1)</sup> Или напряженностью электрического поля.

гия выражается формулой

$$U_{AB} = \frac{e_A e_B}{r_{AB}} \quad (4)$$

при условии, чтобы она обращалась в нуль, когда частицы находятся на бесконечно большом расстоянии друг от друга. В общем случае любого числа наэлектризованных частиц потенциальная энергия образуемой ими системы сводится к сумме выражений (4) для каждой пары частиц, взятой в отдельности. Потенциальная энергия одной частицы по отношению к остальным может быть определена как сумма выражений (4) для всех комбинаций данной частицы с остальными. Отсюда следует, что потенциальная энергия системы нескольких частиц равна половине суммы потенциальных энергий каждой из них по отношению к остальным (ср., напр., случай двух частиц).

Потенциальная энергия  $U$  наэлектризованной частицы в данном электрическом поле может быть представлена, подобно действующей на нее силе  $\vec{f}$ , в виде произведения ее заряда  $e$  на некоторый множитель  $V$  по формуле

$$U = eV. \quad (5)$$

Этот множитель (соответствующий напряженности поля  $\vec{E}$ ) представляет собой потенциальную энергию единицы положительного заряда, помещенной в рассматриваемой точке, и называется *электрическим потенциалом*. В случае электрического поля, создаваемого точечным зарядом  $e_A$ , потенциал в точке  $B$  определяется формулой

$$V_{AB} = \frac{e_A}{r_{AB}}. \quad (6)$$

Работа, совершаемая силой  $\vec{f}$ , действующей на заряд  $e$  при перемещении его на бесконечно малый отрезок  $\Delta s$ , равна произведению  $f_s \cdot \Delta s$ , где  $f_s$  обозначает проекцию вектора  $\vec{f}$  на направление  $\Delta s$ . Приравнявая эту работу уменьшению потенциальной энергии  $U$ , получаем

$$f_s = \frac{U_1 - U_2}{\Delta s} = - \frac{\Delta U}{\Delta s},$$

где  $U_1$  и  $U_2$  — значения  $U$  в начале и в конце отрезка  $\Delta s$ . Это равенство по разделению на  $e$  превращается в со-

отношение между электрической напряженностью и потенциалом:

$$E_s = \frac{V_1 - V_2}{\Delta s} = - \frac{\Delta V}{\Delta s}. \quad (7)$$

Оно выражает то обстоятельство, что *слагающая электрической напряженности в каком-либо направлении равна быстрой падению потенциала в этом направлении*. Направление вектора  $\vec{E}$  совпадает, т. обр., с направлением наиболее быстрого падения  $V$ , при чем величина  $E$  равна быстрой этого падения (определяемого как отношение разности потенциалов на концах соответствующего отрезка к длине последнего). Вектор  $\vec{E}$  называется при этом *градиентом* потенциала  $V$ .

Для наглядного изображения электрического поля служат так называемые *силовые линии* и *эквипотенциальные поверхности*. Первые проводятся таким образом, чтобы направление их в каждой точке совпадало с направлением  $\vec{E}$  в этой точке и чтобы, далее, *густота* их вблизи нее была пропорциональна величине  $E$ . При этом "густота" определяется числом линий, пересекающих единицу перпендикулярной к ним поверхности. Подобные поверхности, перпендикулярные к силовым линиям, характеризуются определенными постоянными значениями потенциала и потому называются эквипотенциальными. В случае точечного заряда, силовые линии образуют равномерно расходящийся во все стороны пучок лучей (гу-

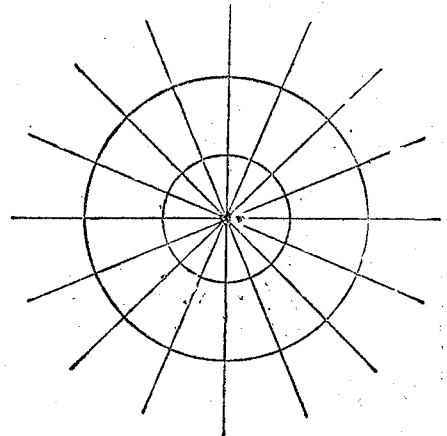


Рис. 1

стот, которого обратное пропорционально квадрату расстояния), а эквипотенциальными поверхностями являются сферы с общим центром в этом заряде.

§ 2. Действие наэлектризованных тел на нейтральные; электростатическая индукция и электрическая поляризация; проводники и диэлектрики. В предыдущем параграфе мы изложили формальные основы учения об электростатических явлениях, введя в качестве основного понятия понятие об *электрическом заряде*. Переходя к рассмотрению конкретного физического содержания этих явлений, мы должны прежде всего ответить на следующий вопрос: почему электрический заряд обыкновенных тел, в противоположность их массе, представляет собой свойство непостоянное, в обычных условиях совершенно исчезающее и появляющееся лишь при определенных воздействиях на эти тела (напр., при трении друг о друга)?

Ответ на этот вопрос непосредственно связан с двойственной природой Э., с существованием электрических зарядов двух противоположных родов, или „знаков“. Мы можем себе представить, что электрические заряды каждого рода подчиняются тому же „закону сохранения“, как и масса, и что, далее, алгебраическая сумма положительных и отрицательных зарядов в каждом теле при обычных условиях равна нулю, т.-е. другими словами, что положительные и отрицательные заряды присутствуют в каждом *ненаэлектризованном*, или *нейтральном* теле в эквивалентных количествах. С этой точки зрения, выдвинутой еще самим Кулоном, электризация какого-либо тела или системы тел означает не появление электрического заряда, которого раньше вовсе не было, но *обнаружение* некоторой части одного из двух маскировавшихся друг друга зарядов противоположного знака *путем частичного разделения* их в пространстве. Электризация двух тел *A* и *B* при соприкосновении или трении обуславливается с этой точки зрения переходом некоторого заряда определенного знака с тела *A* на тело *B*. Этот заряд *e*, не будучи компенсирован зарядом противоположного знака, обнаруживается на теле *B*

в виде заряда  $e_b = e$ , а на теле *A* в виде оставшегося некомпенсированным зарядом противоположного знака  $e_a = -e$ . Практически существенный вопрос о том, какой из двух противоположных зарядов считать положительным и какой отрицательным, не имеет принципиального значения. По первоначальному определению принято считать отрицательным тот заряд, который появляется на стекле при трении его об амальгамированную кожу. Наоборот, вопрос о том, как велики электрические резервы, скрывающиеся в каждом теле, т.-е. как велики запасы положительного и отрицательного Э., которые в нем компенсируются, имеет чрезвычайно большое принципиальное значение, но не играет никакой практической роли. Практически эти запасы можно считать неисчерпаемыми, т.-е. бесконечными.

Наличие противоположных электрических зарядов в любом нейтральном теле легко обнаруживается благодаря воздействию, которое оно испытывает со стороны какого-нибудь наэлектризованного тела. Это воздействие заключается во *взаимном притяжении* (напр., притяжении бузиновых шариков наэлектризованной стеклянной палочкой), быстро ослабевающим с увеличением расстояния—значительно быстрее, нежели притяжение между двумя противоположно наэлектризованными телами. Причина рассматриваемого притяжения заключается в следующем. Под влиянием заряженного тела *A* заряды противоположного знака, скрывающиеся в нейтральном теле *B*, испытывают притяжение, а заряды того же знака—отталкивание. Результатом этих сил является некоторое приближение первых к телу *A* и некоторое удаление вторых, чем в свою очередь обуславливается некоторое увеличение сил притяжения и некоторое ослабление сил отталкивания. А так как при первоначальном равномерном распределении зарядов обоих знаков по всему объему тела *B* эти силы взаимно уравновешивались, то теперь при видоизмененном распределении, вызванном или, как говорится, „индуцированным“ зарядом *A*, силы притяжения получают некоторый перевес над силами отталкивания. Этот перевес и обнаруживается нами как

сила притяжения между наэлектризованным телом  $A$  и нейтральным телом  $B$ .

Указанное явление носит название *электростатической индукции*, или „электризации через влияние“. Однако, это обозначение имеет смысл лишь в том случае, когда, отделив друг от друга две половины тела  $B$  — ближайшую к  $A$  ( $B_1$ ) и более отдаленную ( $B_2$ ) — мы обнаруживаем на каждой из них электрические заряды. Само собой разумеется, что эти заряды равны друг другу по величине и противоположны по знаку, при чем заряд ближайшей к  $A$  половины  $B$  противоположен по знаку заряду  $A$ , а заряд другой половины совпадает по знаку с  $A$  (рис. 2).

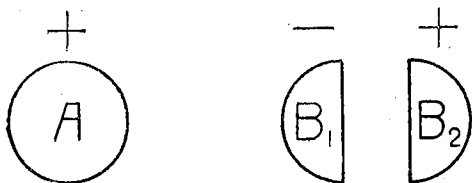


Рис. 2.

Однако, во многих случаях обе половины тела  $B$ , по отделении их друг от друга, остаются нейтральными, испытывая каждая в отдельности со стороны  $A$  притяжение того же рода (хотя и меньшей силы), как и все тело  $B$ . В подобных случаях состояние, в которое приводится тело  $B$  электрическим полем, исходящим от  $A$ , называется *электрической поляризацией*. Такую же „поляризацию“ (вместо электризации) мы находим и в каждой из половинок тела  $B$  по отделении их друг от друга. В случае поляризации, так же как и в случае электризации через влияние, мы имеем дело со сдвигом противоположных зарядов в противоположные стороны. Разница между ними заключается, очевидно, в том, что во втором случае в теле имеются заряды, могущие свободно перемещаться по *всему его объему*, тогда как в первом случае заряды противоположного знака остаются прочно связанными друг с другом внутри очень маленьких элементов объема тела. Тела, содержащие свободно перемещающиеся или просто „свободные“ заряды, называются *проводниками*; сюда относятся прежде всего *металлы*, а также *электролиты* (вод-

ные растворы солей, кислот и щелочей). Остальные тела, содержащие одни только связанные заряды, называются *изоляторами*, или *диэлектриками*. Само собой разумеется, что наличие в теле свободных зарядов отнюдь не исключает наличия в нем связанных<sup>1)</sup>.

§ 3. *Электрическая природа сил молекулярного сцепления и химического средства: ионы и атомы Э.* Мельчайшими частицами материальных тел обычно считаются молекулы и атомы. Описанные выше электрические свойства материальных тел естественно наводят на мысль о том, что эти частицы, и в частности атомы, состоят из еще более мелких частей, обладающих электрическими зарядами противоположного знака, которые являются столь же неизменным и неотъемлемым их свойством, как и масса. Это представление о существовании субатомных наэлектризованных частиц, из которых слагаются обыкновенные нейтральные атомы, образует сущность *современной электрической теории материи* (см. *материя и электронная теория*). Оно дает возможность свести междоатомные и междумолекулярные силы, т. е. в сущности все силы природы, кроме сил ньютоновского тяготения, — к электрическим силам, с которыми действуют друг на друга по закону Кулона заряженные элементарные частицы, из которых состоят атомы. Так, напр., силы молекулярного сцепления (см. *XLI*, ч. 5, 607/09), т. е. силы взаимного притяжения, которые оказывают друг на друга нейтральные атомы и молекулы при очень малом расстоянии между ними и которыми обусловливается существование твердых и жидких тел, могут быть в принципе объяснены по такой же схеме, которая была применена выше к объяснению притяжения между наэлектризованным и нейтральным телом.

Предположим, напр., что рассмотренное выше тело  $A$  представляет собой нейтральную молекулу — так же, как и тело  $B$ . Поскольку частица  $A$  состоит из нескольких наэлектризованных частиц, вокруг нее должно иметься элек-

<sup>1)</sup> К таким телам принадлежат проводники и так наз. полупроводники.

трическое поле, практически исчезающее на таких расстояниях, которые велики по сравнению с размерами  $A$ , т.е. с расстояниями между образующими ее заряженными частицами<sup>1)</sup>, но более или менее значительное — сравнимое с полем каждого из этих зарядов в отдельности — на расстояниях того же порядка величины, т.е. близких к молекулярным размерам. Находясь в этом поле, молекула  $B$  может поляризоваться совершенно таким же образом, как и в поле заряженного тела. Мы предполагаем при этом, что заряженные частицы, из которых складывается  $B$ , не могут оторваться друг от друга, но перемещаются таким образом, чтобы притягиваемые частицы приблизились к  $A$ , а отталкиваемые, наоборот, удалились.

На ряду, однако, с подобной поляризацией, при которой молекула  $B$  ведет себя как маленькое диэлектрическое тело, приближение притягиваемых и удаление отталкиваемых частиц может осуществляться также, вообще говоря, путем надлежащей ориентации молекулы  $B$  по отношению к  $A$  (подобно тому, как это происходит в случае двух магнитов, см. *магнетизм*). Само собой разумеется, что аналогичные изменения в строении и ориентации молекулы  $A$  вызываются электрическим полем молекулы  $B$ . В результате подобной взаимной поляризации и взаимной ориентации, между обеими молекулами появляется сила притяжения, чрезвычайно быстро убывающая с увеличением расстояния (примерно, обратно пропорционально седьмой степени расстояния), но при малых расстояниях могущая достигать очень большой величины<sup>2)</sup>.

Аналогичными соображениями объясняется в принципе происхождение сил химического сродства между атомами (см. XLV; ч. 2, 346/47; ср. *элементы*). В некоторых случаях, однако, электрическая природа этих сил является непосредственно очевидной. Это относится к веществам, образующим при раство-

рении в воде так называемые *электролиты*. В то время, как в безводном состоянии эти вещества (соли, кислоты, щелочи) являются изоляторами, водные растворы их являются проводниками, т.е. содержат электрические заряды, могущие свободно перемещаться по всему объему раствора. Ближайшее исследование показывает, что эти заряды связаны с отдельными атомами или группами атомов, из которых состоят рассматриваемые молекулы и на которые они могут распасться при химических процессах. Подобные заряженные атомы или группы атомов называются *ионами* (см. XXII, 659 сл.), а самый процесс распада нейтральных молекул на (противоположно заряженные) ионы называется *ионизацией*, или *электролитической диссоциацией* (см. *электрохимия*).

То обстоятельство, что в водном растворе молекула распадается на ионы свидетельствует о том, что и в нерастворенном состоянии она образована соединением противоположных ионов, а не нейтральных атомов. Отсюда ясно, что в данном случае химические силы, по крайней мере отчасти, сводятся к электрическому притяжению между противоположными ионами.

Вещества, молекулы которых образованы не нейтральными атомами, но ионами, называются ионными, или *гетерополярными*. Одним из простейших их представителей является поваренная соль, молекула которой состоит из положительного иона натрия ( $\text{Na}^+$ ) и отрицательного иона хлора ( $\text{Cl}^-$ ), или соляная кислота  $\text{H}^+\text{Cl}^-$ , где  $\text{H}^+$  обозначает положительный ион водорода. В сухом состоянии эти вещества не проявляют своих специфических свойств, приобретая их лишь в водном растворе. Роль воды заключается при этом в ослаблении связи между противоположными ионами (благодаря их притяжению к молекулам воды). В результате химическое разложение, которое при отсутствии воды требовало бы очень высокой температуры, осуществляется и при обычных температурах.

Представление о ионной структуре молекул весьма широкого класса веществ и о чисто электрической приро-

<sup>1)</sup> При этом все частицы действуют приблизительно так, как если бы они были сконцентрированы в одной точке с полным зарядом  $= O$ .

<sup>2)</sup> Эти представления о природе сил сцепления были впервые развиты Кезоном (1913) и Лебаем (1920), а в последнее время, на основе квантовой механики, Лондоном (1931).

де сил химического сродства между образующими их ионами в связи с учением о химической валентности приводит неизбежным образом к представлению об *атомизме* электрического заряда. Валентность каждого атома (или группы атомов) определяется в химии как число атомов водорода, которые он (или она) может замещать или удерживать в химическом соединении (см. *элементы*). При этом имеются в виду не нейтральные атомы, но *ионы*, и в частности ионы водорода. Считая, что последние имеют всегда один и тот же положительный заряд (+e), мы оказываемся вынужденными приписать всем другим ионам заряды *равные* или *кратные* этому элементарному заряду со знаком + для положительных ионов (замещающих водород) и знаком — для ионов отрицательных (удерживающих водород). В самом деле, если, напр., в молекуле серной кислоты  $H_2SO_4$  ион H имеет тот же заряд, что и в молекуле соляной кислоты HCl, то это значит — в виду нейтральности обеих молекул, — что ион Cl имеет отрицательный заряд той же величины (—e), а ион  $SO_4$  отрицательный заряд вдвое большей величины. Вообще посылку валентность различных атомов (или атомных групп) по отношению к водороду выражается небольшими *целыми* числами (*k*), электрический заряд этих атомов (или групп) должен составлять небольшое целое кратное этого или протоположного заряда, т. е. должен равняться  $\pm ke$  ( $k=1; 2...$ ).

Другими словами — электрический заряд любой материальной частицы может составлять лишь целое число *элементарных электрических зарядов*, или „атомов электричества“  $\pm e$ . Подобные „атомы электричества“ следует при этом представлять себе *не как нечто отдельное от материи, а как минимальные электрические заряды простейших субатомных ее частиц*.

Вопрос только в том, что именно представляют собой эти частицы?

§ 4. *Протоны и электроны*. Ответ, к которому пришла современная физика, в высшей степени прост и сводится к следующему. Простейшими положительными (т. е. положительно заряженными) частицами материи являются

положительные ионы самого легкого химического элемента — водорода, так называемые *протоны*. Что касается простейших отрицательных (т. е. отрицательно заряженных) частиц материи, то таковыми мы можем считать их партнеров, образующих в соединении с ними нейтральные водородные атомы. Эти отрицательные частицы называются *электронами*. Всякий более сложный атом представляет собой систему, образованную соединением нескольких протонов и такого же числа электронов. То обстоятельство, что электроны не обнаруживаются в виде отрицательных ионов водорода, объясняется чрезвычайной малостью их *массы* по сравнению с массой протонов в связи с способностью их связываться с другими более тяжелыми частицами, как нейтральными (атомы, молекулы), так и положительно заряженными. При этом положительные ионы образуются из нейтральных атомов путем отделения одного или нескольких электронов, а отрицательные — путем присоединения одного или нескольких электронов. Число потерянных или захваченных электронов и определяет *валентность* иона. Протоны никогда не переходят от одного атома к другому. В каждом атоме они образуют вместе с частью электронов центральный сгусток — так называемое *положительное ядро*, являющееся средоточием практически всей *массы* атома. Остальные электроны образуют „оболочку“ атома, вращаясь вокруг ядра подобно тому, как планеты вращаются вокруг солнца (см. *электронная теория*).

Не останавливаясь на дальнейшем обосновании или развитии этой „ядерной“ теории строения атомов (предложенной в 1911 г. *Резерфордом*), мы приведем лишь данные относительно заряда протонов и электронов<sup>4)</sup>. Заряд этот  $\pm e$  равен  $4,77 \cdot 10^{-10}$  абс. электрост. единиц. Чтобы составить себе представление об этой цифре, заметим, что в одном грамме водорода содержится  $6,06 \cdot 10^{23}$  атомов, т. е. следова-

<sup>4)</sup> Эти данные могут быть получены путем измерения количества  $\Delta$ , переносимого в элек. роллетах при прохождении электрического тока определенным весом количества материи.

тельно  $6,06 \cdot 10^{23}$  протонов и столько же электронов. Таким образом, запас положительного и отрицательного электричества в одном грамме водорода, а следовательно и всякого другого вещества (поскольку все атомы состоят из протонов и электронов) выражается приблизительно в тех же единицах числом

$$e = \pm 3,4 \cdot 10^{14}$$

Это значит, что если бы мы могли сконцентрировать в одной точке (А) весь положительный, а в другой (В) весь отрицательный заряд, тящийся в 1 грамме материи, то на расстоянии  $r$  сантиметров эти заряды притягивали бы друг друга с силой

$$f = \frac{(3,4 \cdot 10^{14})^2}{r^2} = \frac{1,16 \cdot 10^{29}}{r^2} \text{ дин,}$$

или, так как 1.000 дин составляет примерно вес одного грамма,

$$f = \frac{1,16 \cdot 10^{26}}{r^2} \text{ гр} = \frac{1,16 \cdot 10^{13}}{r^2} \text{ кг} = \\ = 1,16 \cdot 10^{20} \cdot r^2 \text{ тонн.}$$

Полагая здесь  $r = 12.000$  км, что составляет приблизительно диаметр земного шара, или  $r = 1,2 \cdot 10^7$  см, получаем

$$f = \frac{1,16}{1,44} \cdot 10^6 \text{ тонны.}$$

Т. обр., если бы нам удалось отделить друг от друга противоположные заряды, содержащиеся в 1 грамме материи, и поместить их на противоположных полюсах земного шара, то на этом колоссальном расстоянии они притягивали бы друг друга с силой около 1 миллиона тонн. Этот результат дает нам некоторое представление о необычайной величине скрытых в материи электрических резервов, а также об отношении между электрическими силами и силами гравитационными. Последние, как мы видим, совершенно исчезают по сравнению с первыми. Однако, именно благодаря своей необычайной величине электрические силы непосредственно не обнаруживаются: они прочно удерживают протоны и электроны в отдельных атомах и молекулах, образуя таким образом нейтральные частицы, которые действуют друг на друга лишь на чрезвычайно маленьких расстояниях.

Те электрические заряды, которые мы сообщаем разным телам путем трения друг о друга или каким-нибудь другими способами и которые порождают непосредственно наблюдаемые электрические силы, ничтожно малы по сравнению с зарядами, которые остаются скомпенсированными в этих телах. Что касается процесса электризации, то так же, как и в случае электризации отдельных атомов и молекул, он сводится обычно к переходу некоторого числа электронов от одного тела к другому. В виду малости массы электронов (а также малости их веса по сравнению с испытываемыми ими электрическими силами) изменение массы тел, связанное с потерей или приобретением ими даже очень большого числа электронов, остается практически совершенно незаметным.

§ 5. *Свободные электроны в металлах.*  
В случае изоляторов и электролитов электроны остаются прочно связанными с отдельными атомами или ионами, и потому присутствие их обнаруживается лишь косвенным образом. Иначе обстоит дело в случае металлов, отличительные свойства которых обуславливаются именно наличием электронов, способных перемещаться по всему объему тела. Подобные электроны называются *свободными* в том смысле, что они не связаны с *определенными* индивидуальными атомами, но могут переходить от одних атомов к другим. Эта относительная „свобода“ не мешает им, однако, быть прочно связанными со всем коллективом атомов в его целом. Таким образом, с электрической точки зрения металлическое тело можно рассматривать как совокупность положительных ионов, спаянных друг с другом совокупностью „обобществленных“ электронов.

Эта своеобразная особенность металлов находит себе выражение в том обстоятельстве, что ионы их, встречаемые в электролитах (а именно в растворах солей и щелочей), так же как ионы водорода, *всегда имеют положительный заряд*. Это означает, что металлические атомы сравнительно легко отдают один или несколько электронов (в зависимости от своей валентности), но не обладают способностью удерживать



посторонние электроны. При сближении металлических атомов друг с другом на достаточно малые расстояния слабо связанные электроны утрачивают связь с определенными атомами и начинают гулять от одного атома к другому, т.е. становятся „свободными“ в указанном выше смысле. По всей вероятности, такое же „освобождение“ электронов, обуславливающее появление у соответствующего тела способности проводить Э. (и электризоваться через влияние), должно было бы наблюдаться также и у диэлектриков, подвергнутых достаточно большому всестороннему давлению. Покамест, однако, необходимых для этого давлений достигнуть не удалось. Обратное, при достаточно удалении металлических атомов друг от друга, напр. при переходе металла в газообразное состояние, электроны должны связываться с отдельными атомами, также как и в случае диэлектриков. И действительно, опыт показывает, что все вещества в газообразном состоянии, в том числе и металлические пары, являются при обычных условиях изоляторами. Присутствие в металлах „свободных“ электронов обнаруживается особенно отчетливо при высоких температурах (порядка тысячи или нескольких тысяч градусов). Будучи слабее связаны с металлом, как целым, нежели положительные ионы, электроны первые начинают испаряться, совершенно подобно тому, как при нагревании смеси двух жидкостей разной летучести, напр. воды и спирта, вначале испаряется преимущественно более летучая жидкость. Испаряющиеся электроны образуют вокруг раскаленного металла нечто вроде атмосферы, которая удерживается притяжением остающегося на металле положительного заряда (подобно тому как атмосферный воздух удерживается притяжением земли), но может быть легко оторвана от него путем компенсации этого заряда зарядом противоположного знака<sup>1)</sup>. Другим средством извлечения „свободных“ электронов из металлов является осве-

щение их ультрафиолетовыми (а в некоторых случаях и видимыми) лучами. Это явление, т.е. вырывание электронов под действием света, носит название *фотоэлектрического эффекта*<sup>1)</sup>. Наблюдение фотоэлектрического эффекта (см. *энергия*) у очень маленьких (микроскопических) металлических пылинки показывает, что заряд их меняется не непрерывным образом, но скачкообразно, соответственно вылетанию одного за другим отдельных электронов. Таким путем Милликену удалось измерить чрезвычайно точно заряд электрона (см. *материя*, XXVІІІ, 332/33); при этом получилась та же цифра, которая была получена ранее на основании данных электролиза для зарядов водородных и других одновалентных ионов. Извлекая электрон из металла нагреванием или светом и исследуя движение его в пустоте под действием электрических и магнитных сил, можно определить отношение заряда электрона к его массе и таким образом, зная первый, вычислить последнюю. Для массы электрона в граммах получается число  $9 \cdot 10^{-28}$ , примерно в 2.000 раз меньшее, чем для массы водородного атома, т.е. протона. Тот же результат можно получить, как показал *Толмэн*, и не вырывая электронов из металла, но исследуя электрический эффект, сопровождающий резкую остановку быстро движущегося металлического тела (напр., быстро вращающегося диска). При этом электроны ведут себя совершенно так же, как пассажиры, находящиеся в вагоне трамвая при резкой остановке: они устремляются вперед по инерции. Это движение электронов по инерции чрезвычайно быстро, впрочем, прекращающееся, может быть легко обнаружено (в виде электрического тока), при чем получаемый эффект оказывается пропорциональным отношению заряда электрона к его массе ( $\frac{e}{m}$ ). Таким образом, зная первый, оказывается возможным вычислить вторую.

§ 6. *Электризация проводников; распределение заряда и потенциала; емкость; конденсаторы; энергия и квази-*

<sup>1)</sup> Испускание электронов раскаленными металлами и углем было впервые открыто *Эдисоном* и подробно изучено *Ричардсоном*; оно поэтому часто обозначается как „эффект Ричардсона“.

<sup>1)</sup> Последний был открыт в 30-х годах XIX века *Столетовым* и *Гальваксом*.

*углубления поля.* Мы не будем углубляться в дальнейшее развитие электронной теории, так как изложенных результатов совершенно достаточно для понимания механизма различных электростатических явлений, и перейдем теперь к более подробному количественному рассмотрению наиболее важных из них. Явления эти разделяются на две категории, соответственно разделению тел с электростатической точки зрения на проводники и изоляторы. При этом в качестве проводников можно ограничиться практически одними лишь металлами. Основным вопросом электростатики проводников (металлов) является вопрос о пространственном рас-

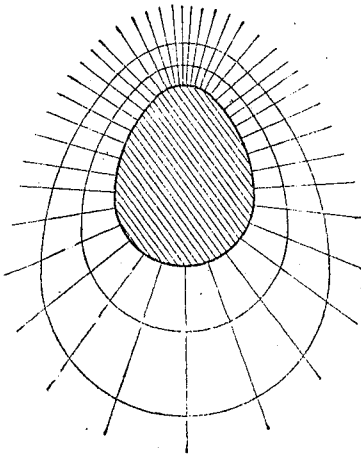


Рис. 3.

пределении заряда, сообщаемого изолированному проводнику. В виду подвижности электрических зарядов (электронов), в нем находящихся, избыточный (некомпенсированный) заряд должен распределиться так, обр., чтобы *внутри проводника электрическое поле исчезло*, т. е. чтобы весь проводник имел один и тот же потенциал  $V$ . Это условие, при котором поверхность проводника является одной из ряда эквипотенциальных поверхностей, характеризующей создаваемое им электрическое поле, оказывается выполненным при определенном распределении заряда проводника на его *поверхности*. Электрические силовые линии оказываются при этом направ-

ленными перпендикулярно к последней (рис. 3) и наибольшей густоты достигают в тех точках, где она имеет наибольшую кривизну. Этому сгущению их соответствует сближение эквипотенциальных поверхностей, расстояние между которыми согласно формуле (7) должно быть тем меньше, чем больше электрическая напряженность  $E$ .

Потенциал наэлектризованного проводника  $V$  пропорционален его заряду  $e$ . Отношение

$$\frac{e}{V} = c \quad (8)$$

называется *емкостью*, или *электроемкостью* проводника. Емкость имеет размерность длины и в случае шаровидного проводника равна его радиусу. Работа, которую нужно затратить для того, чтобы увеличить заряд  $e$  на бесконечно малую величину  $de$  при данном потенциале  $V$ , равна, по определению потенциала, произведению  $Vde$ . Отсюда для полной (электростатической) энергии наэлектризованного проводника получается выражение

$$W = \frac{1}{2} e V = \frac{1}{2} c V^2 = \frac{e^2}{2c} \quad (9)$$

Это выражение непосредственно следует также из сделанного в § 1 замечания о том, что потенциальная энергия любой системы точечных зарядов равна половине суммы энергий каждого из них по отношению к остальным.

Для измерения потенциала проводника (а следовательно и его заряда), служат приборы, называемые *электроскопами*, или *электрометрами*. Они представляют собой проводники с подвижными частями (напр. листочки электроскопа), которые при наличии одноименной электризации взаимно отталкиваются с силой, пропорциональной квадрату заряда. Обладая очень малой емкостью, эти приборы, будучи присоединены (металлической проволокой) к рассматриваемому проводнику, отнимают у него очень малую долю его заряда, при чем вся система принимает потенциал, практически не отличающийся от первоначального потенциала изолированного проводника (совершенно подобно тому, как это происходит при измерении температуры большого тела маленьким термометром). Если вблизи наэлектризованного прс-

подника  $A$  поместить другой нейтральный  $B$ , то на ближайшей стороне последнего появляется заряд противоположного, а на отдаленной—того же знака (электростатическая индукция, см. рис. 2). При этом потенциал  $A$  (численно) уменьшается, благодаря действию зарядов, индуктированных им на  $B$ , а заряд  $A$  распределяется по его поверхности несколько иначе, чем при отсутствии  $B$ . Уменьшение потенциала  $A$  под влиянием  $B$  при неизменности заряда  $e_A$  можно рассматривать как результат *увеличения емкости*. Это увеличение емкости тем больше, чем больше проводник  $B$  и чем меньше его расстояние от  $A$ . Для максимального увеличения емкости  $A$  проводник  $B$  составляется из двух частей: небольшой части  $B_1$ , близкой по размерам и форме к  $A$  и помещаемой на очень маленьком от него расстоянии, и очень большой части  $B_2$ , соединенной с  $B_1$  проволокой (рис. 4). Частью  $B_2$  обычно служит земля, т. е. земной шар. При таких условиях на  $B_1$  индуктируется заряд приблизительно равный и противоположный  $A_1$ . Если заряд  $A$  отрицателен, то мы имеем дело с фактическим уходом в землю части электронов в  $B_2$ ; в противном случае уход положительного заряда с  $B_1$  в землю означает на самом деле приток электронов (в эквивалентном количестве) из земли к  $B_1$ . В результате получается прибор, называемый *электрическим конденсатором* в виду того, что он позволяет накапливать большие заряды при сравнительно малых потенциалах (см. *конденсатор*). Заметим, что потенциал системы  $B_1 B_2$ , т. е. потенциал земли, обычно принимается за нуль, так как для определения напряженности поля существенны лишь *разности* потенциалов, а не их абсолютные знаки.

Рассмотрим для примера, а также для элементарного вывода некоторых важных общих соотношений случай шарового и плоского конденсатора. Первый образован двумя концентрическими шарами—внутренним ( $A$ ) и внешним ( $B_1$ ), который сцепляется с землей. Заряд, распределенный равномерно на поверхности шара, внутри его не создает никакого поля, а наружу действует таким же образом, как точечный

заряд той же величины, сосредоточенный в центре шара. Отсюда следует, что потенциал на поверхности и внутри шара радиуса  $a$  с зарядом  $e$  равен  $\frac{e}{a}$  (что соответствует приведенному выше определению емкости шара). При этом считается, что потенциал обращается в нуль на бесконечном расстоянии. Если первый шар окружен вторым с радиусом  $b > a$  и с зарядом  $-e$ , то потенциал внутри первого шара оказывается равным  $\frac{e}{a} - \frac{e}{b}$ , а снаружи второго—нулю. Ничто не изменится поэтому, если мы второй шар соединим с землей. Электрическое поле между обоими шарами совпадает с полем внутреннего шара, т. е. равно  $E = \frac{e}{r^2}$ , где  $r$ — расстояние от их общего центра ( $a \leq r \leq b$ ).

Емкость внутреннего шара  $c = \frac{e}{V_A}$  определяется при том формулой  $V_A = e \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)$ , т. е. равна  $c = \frac{ab}{b-a}$ , или приблизительно, если разность  $b-a = d$  мала в сравнении с  $a$ ,  $c = \frac{a^2}{d} = \frac{S}{4\pi d}$ , (10)

где  $S = 4\pi a^2$  обозначает поверхность шара. Заметим, что напряженность поля на поверхности первого шара (с наружной стороны) связана с зарядом  $\eta = \frac{e}{S}$ , приходящимся на единицу его поверхности, соотношением

$$E = 4\pi\eta. \quad (11)$$

Такое же соотношение (с противоположным знаком) мы получаем для поверхности второго шара (с внутренней стороны).

Вырезав из нашего шарового конденсатора маленький кусок, образованный двумя почти плоскими поверхностями, линейные размеры которых велики в сравнении с их рас-

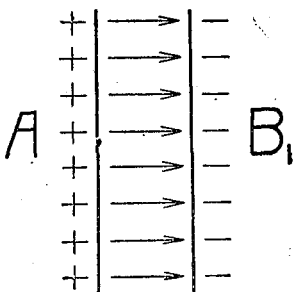


Рис. 4.

стоянием  $d$ , мы получим *плоский конденсатор* (рис. 4). Емкость его поперечному будет определяться формулой (10), если подразумевать в ней под  $S$  площадь каждой из пластин ( $A$  или  $B_1$ ). Остается также в силе и соотношение (11) для поля внутри него. Поле это (в противоположность случаю шарового конденсатора) складывается из двух равных частей, зависящих соответственно от обеих пластин. Таким образом, поле каждой пластинки можно считать однородным, т. е. независимым от расстояния (поскольку последнее мало в сравнении с поперечными ее размерами), и равным  $2\pi\eta$ . Отсюда следует, что сила притяжения между обеими пластинками не зависит от их расстояния и равна  $2\pi\eta e = 2\pi\eta^2 S$ . Работа, которую нужно затратить для того, чтобы раздвинуть обе пластинки на расстояние  $d$ , равна, следовательно,

$$2\pi\eta^2 S d = 2\pi\eta^2 V = \frac{E^2}{8\pi} V,$$

где  $V = Sd$  объем пространства, заключенного между пластинками конденсатора, где действует поле с напряженностью  $E = 4\pi\eta$  (вне этого объема поле практически отсутствует).

Итак, мы видим, что для создания однородного поля  $E$  в объеме  $V$  необ-

ходимо затратить энергию  $\frac{E^2}{8\pi} V$ , пропорциональную объему поля и квадрату его напряженности. Этот результат показывает, что электрическую энергию можно рассматривать как величину, локализуемую в пространстве, непосредственно связанную с электрическим полем и распределенную в нем с объемной плотностью

$$\frac{E^2}{8\pi}. \quad (12)$$

Это определение энергии совпадает с тем, которое получается из формулы (9), если подставить в нее выражения (11) для  $e$  и (10) для  $E$ . В самом деле, полагая

$$W = \frac{e^2}{2c}, \quad e = \eta S = \frac{E S}{4\pi} \quad \text{и} \quad c = \frac{S}{4\pi d},$$

находим

$$W = \frac{E^2}{8\pi} S d,$$

где множитель  $Sd$  представляет собой объем электрического поля. Заметим, что плотность энергии  $\frac{E^2}{8\pi}$  численно

совпадает с силой притяжения, действующей на единицу площади одной из пластинок конденсатора со стороны другой. Этот результат также легко обобщается на случай произвольной системы заряженных проводников. Его можно представить себе наглядным образом, рассматривая электрические силовые линии как растянутые упру-

гие нити, а силу  $\frac{E^2}{8\pi}$  как упругое на-

пряжение вдоль этих нитей, отнесенное к единице площади перпендикулярной к ним поверхности. Это представление было введено *Максуэллом*, который дополнил его представлением о поперечном давлении (или „распоре“) электрических силовых линий той же самой величины, как и продольное натяжение.

Т. обр., электростатические явления могут быть описаны двумя различными способами. Во-первых, как то или иное распределение на проводниках (или внутри них) подвижных электрических зарядов, действующих друг на друга через отделяющее их пустое пространство по закону Кулона. И, во-вторых, как то или иное распределение в этом пространстве электрического поля, связанного с определенной энергией, а также определенными квази-упругими напряжениями, которые, „зацепляясь“ за поверхность проводников, вызывают наблюдаемые взаимодействия между ними. В первой картине основной, первичной реальностью являются электрические заряды (вернее заряженные материальные частицы), тогда как электрическое поле играет вспомогательную роль своего рода *посредника* между ними. А именно, вместо того, чтобы рассматривать действие заряда  $e_A$  на заряд  $e_B$  как нечто непосредственно данное (законом Кулона), мы можем рассматривать его, как результат действия на заряд  $B$  (или  $A$ ) электрического поля, создаваемого зарядом  $A$  (или  $B$ ). Без всякого ущерба для результатов можно было бы при этом понятие поля совершенно исключить из рассмотрения. Наоборот, во второй картине основной первичной реальностью является именно электрическое поле; электрические заряды рассматриваются здесь просто

как начальные или конечные точки силовых линий (т.е. как те точки, где эти линии зацепляются за материальные тела) и не играют никакой самостоятельной роли. Поскольку при этом с силовыми линиями как таковыми не связываются никакие материальные представления, обе картины являются формально эквивалентными.

Однако, фактически вторая картина, „картина поля“, развилась (в XIX веке) в связи с представлением о том, что электрические силы обусловлены упругими напряжениями в некоторой материальной среде — эфире — наполняющей пространство, которое нам кажется совершенно пустым. Энергия поля и максвелловские напряжения рассматривались при этом как упругая энергия и упругие напряжения, обусловленные деформацией эфира. Отвергая эфир как совершенно ненужную фикцию и рассматривая электрические заряды как неотъемлемое свойство элементарных частиц материи (электронов и протонов), мы, естественно, несмотря на формальную эквивалентность первой и второй картины, должны отдавать принципиальное предпочтение первой, как выражающей реальные соотношения наиболее непосредственным образом (подробнее см. *физика*, особенно XLIII, 325 сл.).

§ 7. *Поляризация диэлектриков.* Вопрос о равновесном распределении электрического заряда на поверхности (или внутри) изолирующего (диэлектрического) тела не имеет смысла, так как, в виду отсутствия свободных электронов в подобном теле, сообщенный ему (путем прибавления или отнятия некоторого количества связанных электронов) заряд может оставаться неопределенно долгое время на одном и том же месте. Поэтому электростатика диэлектриков заключается в изучении той *поляризации*, которую они испытывают в электрическом поле, исходящем от заряженных проводников. Как уже указывалось в § 2, поляризация эта сводится, вообще говоря, к смещению зарядов противоположного знака внутри отдельных молекул в противоположные стороны, положительных — в направлении поля (т.е. век-

тора напряженности  $\vec{E}$ ), а отрицательных — в противоположном направлении. В тех случаях, когда молекулы тела построены из противоположно заряженных ионов и могут более или менее свободно вращаться, поляризация тела вызывается не только поляризацией молекул, но и их *ориентацией*. Последняя происходит путем поворота *электрических осей* молекул, т.е. прямых, проведенных от их отрицательных концов к положительным, в направлении электрического поля. Нейтральная частица, образованная совокупностью двух равных и противоположных электрических зарядов ( $\pm e$ ), смещенных по отношению друг к другу на некоторое очень маленькое расстояние  $d$ , называется электрическим диполем; свойства подобного диполя характеризуются вектором, равным произведению  $ed$  и направленным от отрицательного заряда к положительному. Этот вектор  $\vec{p} = e\vec{d}$  называется *моментом диполя*, или *электрическим моментом*.

Молекулы поляризованного тела, независимо от происхождения этой поляризации (путем деформации или ориентации), можно представить себе схематически в виде подобных диполей, с электрическими моментами, параллельными электрическому полю в соответствующей точке и в первом приближении пропорциональными его напряженности  $E$ . При этом следует учитывать не только *внешнее* поле, в которое вводится диэлектрик, но также и то поле, которое им самим создается вследствие его поляризации. Внутри поляризованного диэлектрика электрические заряды составляющих его диполей обычно взаимно компенсируются. Некомпенсированным таким образом остаются лишь *крайние* заряды, т.е. обнаженные (наружные) концы диполей, образующих его *поверхность* (точнее поверхностный слой), поскольку оси непараллельны поверхности. В результате, поляризованный диэлектрик в отношении испытываемых и производимых им действий оказывается эквивалентным проводнику с надлежащим образом распределенным *поверхностным* зарядом. Общая величина

этого заряда должна, конечно, равняться нулю (в виду нейтрального диэлектрика); соответственно этому на различных (обычно противоположных)

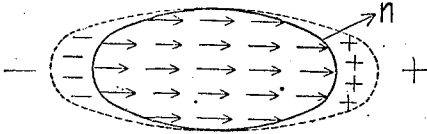


Рис. 5.

участках поверхности он принимает разные знаки. На рис. 5 представлен равномерно поляризованный диэлектрик. Стрелки обозначают образующие его диполи, а толщина ограниченного пунктиром слоя характеризует поверхностную плотность эквивалентного заряда, т.е. „связанный“ заряд, приходящийся на единицу поверхности. Легко показать, что эта плотность  $\eta$  равна проекции на внешнюю нормаль  $\vec{n}$  к поверхности в соответствующей точке так называемого вектора поляризации  $\vec{P}$ , равного (геометрической) сумме моментов диполей, содержащихся в единице объема тела, или, короче, электрическому моменту единицы объема. Мы имеем, следовательно, соотношение

$$\eta = P_n. \quad (13)$$

Следует заметить, что взаимная компенсация зарядов диполей внутри поляризованного диэлектрика не всегда бывает полной. Поэтому в общем случае поляризация оказывается эквивалентной определенной электризации тела не только по поверхности, но и по объему. Если к наэлектризованному проводнику  $A$  поднести диэлектрик  $B$ , то на поверхности последнего появляется, благодаря поляризации, связанный заряд, сходный по своему распределению с свободным зарядом, который был бы индуцирован проводником  $A$  на теле  $B$ , если бы оно являлось также проводником. Естественно, однако, ожидать, что связанные поверхностные заряды, обусловленные смещением электронов в отдельных молекулах, должны быть меньше поверхностных зарядов, образованных перемещением электронов в проводнике тех же размеров и

формы. Соответственно этому взаимное притяжение  $A$  и  $B$ , а также понижение потенциала  $A$ , вызываемое  $B$ , должно быть меньше в случае диэлектрика, чем в случае проводника. Отношение этих эффектов друг к другу может служить приблизительной мерой степени связанности электронов в рассматриваемом диэлектрике. В случае абсолютно связанных электронов диэлектрик  $B$  не испытывал бы со стороны  $A$  и не оказывал бы на него никакого действия. Необходимо, впрочем, заметить, что рассматриваемое отношение зависит не только от внутренних свойств тела  $B$ , но также от его геометрических свойств и положения по отношению к  $A$ . Чтобы отвлечься от этих несущественных обстоятельств, представим себе, что тело  $B$  окружает  $A$  со всех сторон, заполняя все пространство от поверхности  $A$  и до бесконечности. Этот случай мы имеем, когда проводник  $A$  находится в однородной диэлектрической среде  $B$  (напр., воздухе, масле и т. д.) достаточно больших, т.е. практически неограниченных размеров. При этом на поверхности  $B$ , прилегающей к  $A$ , появляется связанный заряд  $-e'$ , частично нейтрализующий свободный заряд  $+e$ , покрывающий поверхность  $A$ . Таким образом, на пограничной поверхности ( $AB$ ) остается фактически лишь некомпенсированный заряд  $e'' = e - e'$ , которым и определяется результирующее электрическое поле  $E$ , создаваемое проводником в окружающем диэлектрике.

Обычно—в огромном большинстве встречающихся на практике случаев—заряд  $e'$ , а следовательно и  $e''$  прямо пропорционален заряду  $e$ , при чем эта пропорциональность относится не только к полным зарядам, но и к зарядам, приходящимся на любой участок поверхности, т.е. к поверхностным плотностям  $\eta, \eta', \eta''$ . При таких условиях электрическое поле, создаваемое проводником  $A$  в пустом пространстве при погружении его в диэлектрическую среду, сохраняет ту же самую структуру, но лишь ослабляется в отношении  $e : e''$ . Коэффициент

$$\epsilon = \frac{e}{e''} \quad (14)$$

характеризует внутренние электрические свойства диэлектрической среды и называется *диэлектрической постоянной* ее <sup>1)</sup>.

В случае проводящей среды мы имели бы, очевидно,  $e' = -e$  и  $e'' = 0$ , т. е.  $\epsilon = \infty$ . Т. обр., с электростатической точки зрения проводник можно рассматривать как изолятор с диэлектрической постоянной, равной бесконечности, а пустоту — как изолятор с диэлектрической постоянной  $\epsilon = 1$ . Диэлектрическая постоянная может служить мерой степени „свободы“ или „смещаемости“ электронов в молекулах диэлектрика, а обратная ей величина — мерой степени их связанности. Впрочем, последнюю представляется более естественным характеризовать величиной отношения  $\frac{e'}{e}$ , равного  $1 - \frac{1}{\epsilon}$ .

Если в однородную диэлектрическую среду с постоянной  $\epsilon$  погружено несколько проводников с зарядами  $e_A$ ,  $e_B$  и т. д., то так же, как и в случае одного проводника, создаваемое ими электрическое поле не изменяет своей структуры и лишь ослабляется в  $\epsilon$  раз (по сравнению с пустотой); действие среды сводится, следовательно, к замене свободных зарядов  $e_A, e_B, \dots$  „эффективными“  $e''_A = \frac{e_A}{\epsilon}$ ,  $e''_B = \frac{e_B}{\epsilon}$  и т. д.

Вместе с напряженностью поля изменяется, и притом в том же самом отношении, и потенциал или разность потенциалов между любыми двумя точками. Применяя этот результат к электрическому конденсатору, мы видим, что емкость его  $c$  при погружении в диэлектрическую среду с постоянной  $\epsilon$  должна *увеличиваться* в  $\epsilon$  раз (при этом емкость определяется попрежнему, как отношение свободного заряда  $A$  к его потенциалу или, вернее, к разности потенциалов между  $A$  и  $B$ ). Следует заметить, что в случае конденсатора погружение в безграничную диэлектрическую среду можно заменить введением этой среды в тот небольшой объем, в котором сосредоточено его электрическое поле.

<sup>1)</sup> Или диэлектрическим коэффициентом.

Присутствие этой среды в остальном пространстве, где поле равно нулю, очевидно, не имеет никакого значения. Т. обр., вводя между пластинками, или, как их называют, „обкладками“, плоского конденсатора слой диэлектрика (жидкого или твердого), который заполняет все пространство между ними, мы повышаем емкость конденсатора в  $\epsilon$  раз, где  $\epsilon$  — диэлектрическая постоянная изоляционной прокладки.

Переходя от напряженности поля к электрической силе, с которой действуют друг на друга проводники, погруженные в диэлектрическую среду, мы получаем разные результаты в зависимости от того, в какой мере мы при этом отделяем проводники от среды. Обычно последняя учитывается лишь при определении эффективного поля, создаваемого одним из проводников ( $A$ ). Сила, испытываемая с его стороны каким-нибудь другим проводником  $B$ , определяется при этом независимо от наличия диэлектрика, т. е. исходя из свободного, а не эффективного заряда  $B$ . При таком условии сила, а следовательно и энергия, оказывается уменьшенной в  $\epsilon$  (а не в  $\epsilon^2$ ) раз, т. е. в том же отношении, как и напряженность поля. Силу, с которой проводник  $A$  с его эффективным зарядом  $\frac{e_A}{\epsilon}$  действует на связанный заряд  $e'_B = -e_A (1 - \frac{1}{\epsilon})$ , прилегающий к  $B$ , представляется естественным отнести не к проводнику  $B$ , но к окружающему его диэлектрику. Эти соображения применимы, разумеется, и к взаимодействию тех элементов, из которых складывается заряд каждого проводника, взятый в отдельности. Т. обр., напр., энергия проводника с зарядом  $e$ , емкость которого в пустоте равна  $c$ , при погружении в диэлектрическую среду с постоянной  $\epsilon$ , оказывается равной не  $\frac{1}{2} \frac{e^2}{c}$ , но  $\frac{1}{2} \frac{e^2}{\epsilon c}$ , что соответствует замене емкости  $c$  на  $\epsilon c$ . То же самое относится и к конденсаторам. Заметим, что уменьшение энергии, т. е. разность

$$w' = -\frac{1}{2} \frac{e^2}{c} \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right) \quad (15)$$

можно при этом рассматривать как энергию, связанную с поляризацией самой среды зарядом  $A$ . Отрицательный знак этой энергии становится вполне естественным, если мы примем во внимание, что связанные электроны в молекулах перемещаются при поляризации диэлектрика в направлении действующих на них сил; таким образом, последние совершают положительную работу за счет электрической энергии всей системы.

Произведение диэлектрической постоянной на напряженность поля, т. е. вектор

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad (16)$$

называется электрической индукцией (или „электрическим смещением“). В случае однородной среды этот вектор равен напряженности того поля, которое получилось бы при ее устранении, т. е. которое зависит от свободных зарядов проводников. У самой поверхности одного из проводников мы имеем соотношения

$$D = 4\pi\eta = 4\pi(\eta' + \eta'') \text{ и } E = 4\pi\eta'',$$

где  $\eta$ ,  $\eta'$  и  $\eta''$  представляют собой поверхностные плотности соответственно свободного, связанного и эффективного заряда. Принимая во внимание, что плотность  $\eta'$  равна согласно (13) поляризации  $\vec{P}$  диэлектрика у поверхности проводника, мы получаем соотношение

$$\vec{D} = \vec{E} + 4\pi\vec{P}, \quad (17)$$

или, следовательно,

$$\vec{P} = k\vec{E}, \quad k = \frac{\epsilon - 1}{4\pi}. \quad (18)$$

Коэффициент  $k$  называется электрической восприимчивостью среды; диэлектрическая постоянная выражается через него формулой

$$\epsilon = 1 + 4\pi k. \quad (19)$$

Нетрудно показать, что предыдущие соотношения остаются справедливыми не только вблизи поверхности проводников, но и для любой точки поляризованного диэлектрика.

Имея в виду взаимодействие проводников через диэлектрик, последнему приписывают энергию, распределенную в нем с объемной плотностью

$$\frac{DE}{8\pi} = \frac{\epsilon E^2}{8\pi} = \frac{D^2}{8\pi\epsilon} \quad (20)$$

и численно равные последней квазиупругие напряжения (продольное натяжение и поперечный распор). При этом, однако, исключается из рассмотрения энергия, связанная с поляризацией самого диэлектрика. Эта энергия получается из предыдущей путем вычитания из нее энергии, соответствующей отсутствию диэлектрика. Считая последнюю распределенной с

объемной плотностью  $\frac{D^2}{8\pi}$ , мы получаем для первой объемную плотность

$$\frac{1}{8\pi} D(E - D) = -\frac{1}{2} DP. \quad (21)$$

Она соответствует энергии  $-\frac{1}{2} E_p$  каждого элементарного диполя, из которых складается поляризованный диэлектрик во внешнем поле  $E$ .

Теория поляризации диэлектриков ограниченных размеров и их воздействия на поляризующие проводники представляет собой большие трудности. Она основывается на том обстоятельстве, что при переходе из пустоты в диэлектрик или через границу двух разных диэлектриков нормальная (перпендикулярная к пограничной поверхности) проекция „индукции“

$\vec{D}$  и тангенциальная (касательная) проекция напряженности  $\vec{E}$  остаются непрерывными. Эти „пограничные условия“ легко выводятся из рассмотрения связанного заряда, находящегося на пограничной поверхности. Плотность последнего  $\eta$  связана с разностью нормальных слагающих напряженности  $\vec{E}$  с обеих сторон поверхности формулой  $E''_n - E'_n = 4\pi\eta$ , а с разностью нормальных слагающих

поляризации  $\vec{P}$  формулой  $P''_n - P'_n = -\eta$ . Отсюда следует  $E''_n + 4\pi P''_n = E'_n + 4\pi P'_n$ , т. е.  $D''_n = D'_n$ . Непрерывность касательной проекции  $\vec{E}$  является непосредственно из того обстоятельства, что поверхностный заряд не создает тангенциального поля. В заключение отметим основные результаты, относящиеся к величине диэлектрической постоянной у разных диэлектриков. В случае газов она весьма близка к 1, при чем разность



$\epsilon - 1$ , т. е., следовательно, восприимчивость, прямо пропорциональна плотности, как и следует ожидать, если вспомнить, что восприимчивость определяет электрический момент приобретаемой в данном поле  $\vec{E}$  единицей объема среды. Поскольку в газе молекулы практически не действуют друг на друга, этот момент должен быть пропорционален числу их в единице объема, т. е. плотности. В случае жидкостей и твердых тел плотности пропорциональна величина

$$\frac{3}{4\pi} \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 2}, \quad (22)$$

которая при близости  $\epsilon$  к 1 обращается в восприимчивость  $k$ . У „гомополярных“ веществ, молекулы которых не обладают постоянным электрическим моментом, диэлектрическая постоянная не зависит от температуры, что весьма естественно, если принять во внимание, что она обуславливается смещением электронов в отдельных атомах. У гетерополярных веществ с дипольными молекулами в газообразном состоянии восприимчивость выражается суммой

$$k = k_0 + \frac{c}{T}, \quad (23)$$

где  $k_0$  и  $c$  обозначают постоянные, а  $T$  — абсолютную температуру. Первый член характеризует ту часть восприимчивости (т. е. поляризации газа), которая обуславливается смещением электронов внутри атомов или ионов, а второй, обратно пропорциональный температуре, — часть, обусловленную ориентацией молекул.

Тепловое движение стремится нарушить правильную ориентацию, вызываемую электрическим полем, чем и объясняется зависимость средней их ориентации от температуры. Формула (23) применима лишь при не очень низких температурах, при чем постоянная  $c$  выражается через момент  $p$  отдельных молекул и число их  $N$  в единице объема формулой

$$c = \frac{p^2 N}{3k},$$

где  $k$  — так называемая постоянная идеальных газов  $\left(\frac{3}{2}kT\right)$  — средняя кинетическая энергия теплового движе-

ния одной молекулы газа). При очень низких температурах все молекулы, поскольку они сохранили бы при этом свободу вращения, были бы *полностью* ориентированы даже сравнительно слабым полем. В той мере, в которой поляризация тела зависит от ориентации молекул, она достигла бы максимальной величины или, как говорится, „насыщения“. Само собой разумеется, что в области близкой к насыщению о пропорциональности между поляризацией и напряженностью поля не может быть и речи. Впрочем, на опыте эта пропорциональность соблюдается весьма хорошо. Это объясняется, с одной стороны, невозможностью исследовать область низких температур при сохранении свободы вращения молекул (т. к. при низких температурах происходит затверждение вещества, а в твердом теле молекулы, как правило, утрачивают способность вращаться), а с другой стороны, практической невозможностью достигнуть полей, необходимых для „насыщения“ поляризации при обычных температурах.

Диэлектрическая постоянная твердых и жидких веществ, молекулы которых не являются постоянными диполями, представляет собой величину, не зависящую от температуры и обычно колеблющуюся в пределах нескольких единиц (напр., стекло, фарфор 6—7, эбонит 2,5). В случае дипольных жидкостей она может достигать при обычной температуре нескольких десятков (напр., 30—40 у спиртов, 80 у воды, 95 у синильной кислоты) и даже сотен<sup>1)</sup>. Недавно обнаружилось, что у некоторых твердых тел с сложными дипольными молекулами диэлектрическая постоянная может достигать в узком температурном интервале колоссальных значений (до 25.000 у сегнетовой соли, согласно опытам *Курчатова* и *Кобеко* в Физ. техн. институте А. Ф. Иоффе).

§ 8. Математическая теория элементарных явлений. а. Теорема Гаусса. Как уже указывалось в § 1, электрическое поле изображается наглядным образом при помощи сило-

<sup>1)</sup> Для электрического момента одной молекулы получаются при этом в значения порядка  $10^{-18}$ .

вых линии, совпадающих по направлению с направлением электрической напряженности  $\vec{E}$  и пропорциональных последней по своей густоте вблизи соответствующей точки. Количество силовых линий, пересекающих данную поверхность  $S$ , представляет собой меру так назыв. *электрического потока* через эту поверхность. При определении величины потока, линии, идущие в одну сторону, соответствующую направлению нормали  $\vec{n}$  к поверхности, считаются со знаком  $+$ , а линии, идущие в противоположную сторону, со знаком  $-$ . Другими словами, электрический поток  $\Phi$  через поверхность  $S$  определяется как *разность* между числом силовых линий, идущих через нее в положительном и отрицательном направлении. Густота линий определяется при этом таким образом, чтобы число линий, пересекающих перпендикулярную к ним единичную площадку, совпадало с численным значением электрической напряженности  $E$ .

При этом условии электрический поток  $d\Phi$  через бесконечно малую площадку  $dS$ , нормаль к которой  $\vec{n}$  образует угол  $\alpha$  с направлением силовых линий (т.е. направлением  $\vec{E}$ ), определяется формулой

$$d\Phi = E \cos \alpha dS = E_n dS, \quad (24)$$

где  $E_n$  обозначает слагающую (проекцию)  $\vec{E}$  в направлении нормали  $\vec{n}$ .

Рассматривая электрический поток через *замкнутую* поверхность  $S$ , обусловленный точечным зарядом  $e$ , нетрудно показать на основании закона Кулона, что этот поток равен нулю, если заряд находится *вне* поверхности, и  $4\pi e$ , если он находится *внутри* нее (положительным направлением считается при этом направление внешней нормали к поверхности  $S$ ). В самом деле, полагая в (24)  $E = \frac{e}{r^2}$  и

замечая, что  $\frac{dS}{r^2} \cos \alpha = d\omega$  представляет собой телесный угол, под которым виден элемент поверхности  $dS$  из соответствующей точки со знаком  $+$ , если последняя находится внутри  $S$ ,

и знаком  $-$  в противоположном случае, получаем

$$\Phi = e \int d\omega = e \cdot 4\pi \text{ или } 0.$$

Этот результат легко обобщается на случай любой системы зарядов  $e_A, e_B$  и т. д., как внутренних, так и внешних (ибо из формулы  $\vec{E}_n = E_{An} + E_{Bn} + \dots$  следует, что общий электрический поток от всех этих зарядов равен алгебраической сумме потоков от каждого из них в отдельности). Т. обр., обозначая через  $e$  результирующий электрический заряд, находящийся внутри  $S$ , мы получаем следующую общую формулу:

$$\oint E_n dS = 4\pi e, \quad (25)$$

где кружок на знаке интеграла указывает на замкнутость поверхности  $S$ .

Из этой формулы, данной впервые Гауссом, между прочим следует, что электрические силовые линии не могут начинаться или обрываться в пустом пространстве, но что они начинаются на положительных зарядах и кончаются на отрицательных.

*в. Уравнения Пуассона и Лапласа.* Если представить себе, что заряд  $e$  не сконцентрирован в отдельных точках, но распределен непрерывным образом с объемной плотностью  $\rho$ , то можно положить в (25)

$$e = \int \rho dv,$$

где  $dv$  представляет собой элемент объема, заключенного внутри  $S$ ; а интегрирование распространяется на весь этот объем.

С другой стороны, поверхностный интеграл, стоящий в левой части (25), может быть преобразован в объемный по следующей (данной Гауссом) формуле:

$$\oint E_n dS = \int \operatorname{div} \vec{E} dv, \quad (26)$$

где символ  $\operatorname{div} \vec{E}$ , называемый „расхождением“, или „дивергенцией“ вектора  $\vec{E}$ , в прямоугольной системе координат  $x, y, z$  выражается формулой

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}. \quad (27)$$

Из равенства  $\int \operatorname{div} \vec{E} dv = \int \rho dv$ , в свя-

зи с произвольностью поверхности  $S$ , вытекает дифференциальное уравнение

$$\operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho, \quad (28)$$

называемое уравнением Пуассона. Это уравнение само по себе еще не эквивалентно закону Кулона. Оно становится эквивалентным последнему в связи с равенством

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} V, \quad (29)$$

где  $V$  обозначает электрический потенциал, а  $\operatorname{grad} V$  — градиент (см. *тензорное исчисление*, XI, ч. 7, 311), вектор с прямоугольными слагающими

$$\frac{\partial V}{\partial x}, \frac{\partial V}{\partial y}, \frac{\partial V}{\partial z}. \quad (30)$$

Напомним, что равенство (29) выражает консервативный характер электростатических сил (§ 1). Легко показать, что оно эквивалентно тождественному (т. е. выполняющемуся для всего пространства) уравнению

$$\operatorname{rot} \vec{E} = 0, \quad (31)$$

где символ  $\operatorname{rot} \vec{E}$  (или  $\operatorname{curl} \vec{E}$ ), называемый вихрем, или ротором  $\vec{E}$ , представляет собой вектор, слагающие которого по осям  $x, y, z$  равны соответственно

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}, \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}, \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y}. \quad (32)$$

Подставляя (29) в (28), мы получаем дифференциальное уравнение второго порядка (Лапласа) для электрического потенциала

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -4\pi\rho. \quad (33)$$

В частном случае пустоты ( $\rho=0$ ) оно обращается в обычное уравнение Лапласа

$$\nabla^2 V = 0. \quad (34)$$

*с. Энергия и напряжение.* В случае электрического заряда, распределенного в пространстве непрерывным образом, электростатическая энергия  $W$  определяется как полусумма энергий каждого из его бесконечно малых элементов по отношению ко всем остальным, т. е. как интеграл

$$W = \frac{1}{2} \int V \rho dv. \quad (35)$$

<sup>1)</sup> Дифференциальный оператор (набла, оператор Гамильтона)  $\nabla$  выражает в символическом виде пространственное дифференцирование так, как, например,  $\frac{\partial}{\partial x}$  обозначает символически частное дифференцирование по  $x$ .

Этот интеграл с помощью уравнения (33) и соотношения (29) может быть преобразован в интеграл

$$W = \int \frac{E^2}{8\pi} dv, \quad (36)$$

взятый по всему электрическому полю, создаваемому рассматриваемым зарядом (а не только по объему последнего). Соответственно этому, электрическую энергию можно представлять себе не как выражение взаимодействия между разными зарядами или элементами одного и того же заряда, но как величину, непосредственно связанную с электрическим полем. Необходимо, однако, иметь в виду, что подобное представление имеет смысл только в том случае, если мы имеем дело с зарядом, распределенным с конечной *объемной* или также *поверхностной* плотностью, и учитываем взаимодействие между всеми бесконечно малыми его элементами. Т. обр., напр., энергия системы, образованной некоторой совокупностью электронов и протонов, может быть представлена в форме (36) только при том условии, если мы будем рассматривать эти частицы не как точечные заряды, а как некоторые протяженные образования (напр., шарики) с объемным или поверхностным зарядом и будем учитывать не только взаимодействие между разными частицами, но также и взаимодействие между элементами одной и той же частицы. Существенно положительный знак энергии (36) объясняется тем обстоятельством, что энергия внутрочастичных сил, являющихся силами отталкивания, всегда больше энергии междучастичных сил (поскольку расстояния между разными частицами больше их собственных размеров).

Сила, действующая на некоторый заряд  $e = \int \rho dv$ , заключенный в объеме  $v$ , непосредственно выражается интегралом

$$\vec{F} = \int \vec{E} \rho dv. \quad (37)$$

Здесь под  $\vec{E}$  подразумевается напряженность электрического поля, обусловленного не только зарядами, находящимися вне объема  $v$ , но и элементами самого заряда  $e$ . Так как, однако,

силы взаимодействия между ними попарно равны и противоположны, то интеграл (37) определяет фактически лишь *внешнюю* силу, которую заряд  $e$  испытывает со стороны зарядов, находящихся вне объема  $v$ .

Пользуясь уравнением Пуассона (28), можно преобразовать объемный интеграл (37) к интегралу

$$\vec{F} = \oint \text{div } \vec{T} dS, \quad (38)$$

распространенному по поверхности  $S$ , его ограничивающей, где  $\text{div } \vec{T}$  есть вектор со слагающими

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial z} \\ \frac{\partial T_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial z} \\ \frac{\partial T_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} \end{aligned} \right\}, \quad (39)$$

а величинами  $T_{xx}$ ,  $T_{yy}$ ,  $T_{zz}$ ,  $T_{xy} = T_{yx}$ ,  $T_{yz} = T_{zy}$ ,  $T_{zx} = T_{xz}$  представляют собой слагающие максвелловского *тензора напряжений*  ${}^2\vec{T}$  (значек  ${}^2$  характеризует ранг этого тензора). Эти слагающие выражаются через слагающие электрической напряженности  $\vec{E}$  по формулам

$$\left. \begin{aligned} T_{xx} = \frac{1}{4\pi} (E_x^2 - E_y^2 - E_z^2), \dots \\ T_{xy} = \frac{1}{4\pi} E_x E_y, \dots \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

и сводятся к уже упомянутым нами выше напряжению вдоль и давлению поперек силовых линий. Т. обр., сила, испытываемая зарядом, находящимся внутри объема  $v$  со стороны зарядов, находящихся вне этого объема, может быть представлена как результат „квази-упругих“ напряжений, распределенных на пограничной поверхности.

*d. Электризация проводников и поляризация диэлектриков.* Вопрос о распределении электрического заряда на поверхности проводника или системы проводников решается обычно путем интегрирования уравнения Лапласа  $\nabla^2 V = 0$  для потенциала того поля, которое ими создается в окружающем пространстве, в связи с условиями  $V = \text{const}$  для поверхности каждого проводника; поверхностная

плотность электрического заряда, его покрывающего, определяется при этом соотношением

$$\eta = \frac{1}{4\pi} E = -\frac{1}{4\pi} \frac{dV}{dn}, \quad (41)$$

где  $\frac{dV}{dn}$  обозначает производную потенциала по внешней нормали. Если общий заряд проводника  $e = \oint \eta dS$  задан, то величина его служит для фиксирования величины потенциала. Наоборот, задание величины потенциала (напр., в случае заземленного проводника) служит для определения величины заряда.

Уравнение Лапласа справедливо и в том случае, когда проводники погружены в однородную диэлектрическую среду. При этом, однако, в соотношениях (41) напряженность поля  $\vec{E}$  следует заменить электрической индукцией  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ . Легко, далее, показать, что в общем случае, при наличии в неоднородном диэлектрике свободных зарядов, объемная плотность последних связана с  $\vec{D}$  таким же образом, как в случае пустоты с  $\vec{E}$ , т. е. уравнением

$$\text{div } \vec{D} = 4\pi\rho. \quad (42)$$

Это уравнение, превращающееся в  $\text{div } \vec{D} = 0$  при  $\rho = 0$ , в случае резкого перехода от одного диэлектрика к другому превращается в пограничное условие, сформулированное в конце предыдущего § (непрерывность нормальной слагающей  $\vec{D}$ ). Вместе с уравнением (29) или (31) оно дает возможность определить однозначным образом распределение поля в пространстве, содержащем наряду с проводниками любые диэлектрики.

Глава II. *Электрический ток.* § 1. *Основные понятия и величины; законы Ома и Джоуля.* Электрический ток обычно определяется как „движение  $\Theta$ “. Необходимо, однако, иметь в виду, что движение нейтральной материи, поскольку последняя состоит из наэлектризованных частиц, должно было бы с точки зрения этого определения также представлять собой электриче-

ский ток. Таким образом, под электрическим током мы можем понимать лишь такое движение  $\mathcal{E}$ ., в котором *противоположные заряды принимают неодинаковое участие* либо в смысле своего количества, либо скорости или же того и другого. Электрический ток должен, следовательно, сопровождаться *переносом электрического заряда от одного места к другому*. Подобного рода перенос мы имеем, напр., при электризации какого-либо проводника путем электростатической индукции, а также при поляризации диэлектрика; само собой разумеется, что по достижении равновесия ток в обоих случаях прекращается.

Наряду, однако, с подобными кратковременными токами, мы имеем в природе и в особенности в технике длительные токи, могущие продолжаться без всякого изменения неограниченно долгое время. Такого рода постоянные, или „стационарные“ токи текут по *замкнутым* линиям, при чем перенос  $\mathcal{E}$ . в этом случае не сопровождается каким-либо изменением в его распределении: на смену уходящим зарядам к каждому элементу объема притекают такие же самые заряды и в том же самом количестве с другой стороны. В простейшей своей форме стационарные электрические токи осуществляются в металлических проволоках, образующих замкнутые контуры. В этом случае ток состоит в движении одних лишь электронов, тогда как металлические ионы остаются неподвижными. В случае неметаллических тел (напр., электролитов) перенос  $\mathcal{E}$ . осуществляется как положительными, так и отрицательными ионами (в частности электронами), при чем противоположно заряженные частицы, поскольку движение их обуславливается тем или иным электрическим полем, движутся в противоположные стороны в соответствии с противоположными направлениями действующих на них электрических сил.

В отношении переноса  $\mathcal{E}$ . движение зарядов какого-либо знака в одну сторону совершенно эквивалентно движению зарядов противоположного знака в противоположную сторону. Количество  $\mathcal{E}$ ., переносимое в единицу

времени через какую-либо (незамкнутую) поверхность  $S$  представляет собой меру *силы электрического тока*, протекающего через эту поверхность. Легко показать, что сила тока, протекающего через единичную площадку в направлении нормали ее  $\vec{n}$ , равна сумме произведений  $Nev$  для всех частиц, участвующих в движении, где  $N$  представляет собой число частиц каждого рода в единице объема,  $e$  — их заряд, а  $v$  — слагающая их скорости в направлении  $\vec{n}$ . Вектор

$$\vec{j} = \sum Nev \quad (1)$$

называется *плотностью* тока. Он численно равен силе тока через единичную площадку, ориентированную наиболее выгодным образом. Заметим, что произведение заряда частицы  $e$  на ее скорость  $\vec{v}$  представляет собой аналог механического „количества движения“, т. е. произведения *массы* частиц на ее скорость. На этом основании вектор  $\vec{ev}$  можно было бы назвать *электрическим количеством движения* рассматриваемой частицы, а вектор плотности тока определить независимо от выбора той или иной поверхности как *электрическое количество движения в единице объема* проводника, или, другими словами, как *объемную плотность* электрического количества движения.

В случае металлов электрический ток, как уже упоминалось выше, обуславливается движением одних лишь электронов. А так как последние имеют *отрицательный* заряд, то согласно определению вектора  $\vec{j}$  движение их происходит в направлении, противоположном направлению тока (т. е. направлению переноса положительного  $\mathcal{E}$ .). В электролитах ток обуславливается движением  $+$  и  $-$  ионов в противоположные стороны.

Что касается диэлектриков, то в них стационарный ток является невозможным. Однако, и в этом случае всякое смещение связанных электронов внутри молекул или изменение ориентации последних составляет электрический ток, плотность которого пропорциональна скорости изменения поляриза-

ции. В самом деле, рассматривая молекулы как диполи с переменными электрическими моментами, нетрудно показать, что электрическое количество движения отдельной молекулы равно скорости возрастания ее момента  $\vec{P}$ , т.е. производной последнего по времени  $\frac{d\vec{P}}{dt}$ . Отсюда для объемной плотности тока в диэлектрике получаем

$$\vec{j} = \frac{d\vec{P}}{dt}, \quad (2)$$

где  $\vec{P}$  — поляризация диэлектрика, т.е. момент единицы объема.

В случае диэлектриков постоянное электрическое поле  $\vec{E}$  вызывает, как мы видели в предыдущей главе (ср. (18)), пропорциональную ему постоянную поляризацию

$$\vec{P} = k\vec{E}, \quad (3)$$

величина которой определяется условием равновесия между „внешними“ электрическими силами, стремящимися раздвинуть противоположные заряды в противоположные стороны, и силами притяжения между этими зарядами (или между ориентирующими силами и дезориентирующим влиянием теплового движения). В случае проводников, поскольку дело касается „свободных“ зарядов, подобные внутренние удерживающие силы отсутствуют. Если бы эти заряды были абсолютно свободны, т.е. не испытывали никаких сил, кроме внешней силы  $e\vec{E}$ , то под влиянием ее они стали бы двигаться равномерно ускоренно с ускорением, равным отношению этой силы к их массе. Подобные условия осуществляются, однако (и то не всегда), лишь в очень разреженных газах. В металлах и других проводниках „свободные“, т.е. подвижные, электроны и ионы оказываются вынужденными пробираться между связанными частицами — заряженными или нейтральными, взаимодействия с которыми вызывает их быстрое торможение. Это торможение можно рассматривать как *силу трения*, которая при малых скоростях должна быть прямо пропорциональна

скорости и противоположна ей по направлению. Уравнение движения „свободных“ частиц под совместным действием этой силы трения и внешней силы имеет вид  $m\vec{v} = e\vec{E} - f\vec{v}$ , где  $f$  — коэффициент пропорциональности, равный отношению силы трения и скорости. В случае постоянного (т.е. не зависящего от времени) поля  $\vec{E}$  скорость частиц, достигнув предельной величины

$$\vec{v} = \frac{e}{f} \vec{E},$$

при которой внешняя сила уравновешивает силу трения, остается затем постоянной.

Таким образом, в противоположность совершенно связанным электронам, которые под влиянием постоянной внешней силы получают пропорциональное ей *смещение*, и совершенно свободным, которые приобретают пропорциональное ей ускорение, „полусвободные“ электроны и ионы в проводящих телах получают при этом пропорциональную внешнему полю *скорость*. Умножая последнюю на заряд частицы, а также на число подобных частиц в единице объема, и оставляя сумму этих выражений для „полусвободных“ частиц разных сортов, если таковые имеются, мы получаем по определению *плотность* тока. Таким образом, последняя оказывается связанной с напряженностью поля соотношением

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \quad (4)$$

где коэффициент пропорциональности  $\sigma$ , называемый *удельной электропроводностью*<sup>1)</sup> данного проводника, выражается формулой

$$\sigma = \sum \frac{Ne^2}{f}. \quad (5)$$

Заметим, что величина  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ , обратная  $\sigma$ , называется *удельным сопротивлением*. Пропорциональность между плотностью тока и напряженностью вызывающего его поля представляет собой основной закон в учении об электрическом токе, называемый законом Ома (см. XXX, 599). Справедли-

<sup>1)</sup> Или удельной электрической проводимостью.

всест его показывает, что движение „полусвободных“ зарядов в проводниках совершается на самом деле достаточно медленно для того, чтобы сила трения оставалась пропорциональной скорости.

Всякое движение с трением сопровождается *нагреванием*. В случае движения „полусвободных“ зарядов в проводнике механизм этого нагревания заключается в передаче ими той кинетической энергии, которую им сообщает внешняя сила, связанным частицам, обуславливающим их торможение. Увеличение энергии колебаний этих связанных частиц (напр., ионов металла) означает не что иное, как *нагревание* образуемого ими тела. Количество тепла  $Q$ , выделяющегося в единице объема проводника за единицу времени, должно равняться работе, произведенной за то же время внешними силами. В случае одной частицы эта работа равна произведению силы  $eE$  на скорость  $v$ . Мы получаем таким образом

$$Q = \sum N e v = (\sum N e v) E,$$

или, следовательно, согласно (1)

$$Q = E j = \sigma E^2. \quad (6)$$

Эта формула выражает так называемый закон *Джоуля*. Здесь теплота  $Q$  выражена в механических единицах (эргах). Для того, чтобы выразить ее в (малых) калориях, необходимо разделить  $Q$  на  $4,2 \cdot 10^7$  (= число эргов в одной калории).

§ 2. *Прохождение электрического тока через разные тела (электропроводность)*. Удельная проводимость различных веществ колеблется в очень широких пределах. Наибольшей величины она достигает у металлов. В принятых нами (электростатических) единицах она выражается в этом случае цифрами порядка  $10^{15}$  —  $10^{17}$ . Это значит, что под действием электрического поля с напряженностью равной 1 (т.е. такой напряженностью, которая могла бы быть обусловлена единицей заряда на единице расстояния) в металле через поперечное сечение в 1 кв. см переносится в 1 сек. примерно  $10^{16}$  единиц Э., или, след., приблизительно

$$\frac{10^{16}}{5 \cdot 10^{-10}} = 2 \cdot 10^{23}$$

электронов. Принимая во внимание, что в единице объема металла содержится примерно столько же свободных электронов, сколько и атомов, т.е. около  $10^{23}$ , мы видим, что при указанных условиях электроны должны двигаться со скоростью порядка 100 см в секунду.

При этом электропроводность металлов с понижением температуры *увеличивается* приблизительно обратно пропорционально абсолютной температуре и еще быстрее в области низких температур. У некоторых металлов (напр., ртуть, олово) вблизи абсолютного нуля температуры электропроводность становится *внезапно* (при понижении температуры на одну сотую или даже тысячную градуса) *бесконечно* большой. Подобное состояние называется „сверхпроводимостью“, а металлы, в нем находящиеся, называются „сверхпроводниками“. В сверхпроводниках закон Ома не имеет места. Под влиянием внешних электрических сил электроны в них движутся так, как они двигались бы в пустом пространстве, т.е. с ускорением, пропорциональным силе. Соответственно этому прохождение тока в сверхпроводнике не сопровождается выделением тепла и не прекращается по устранении вызвавших его сил, продолжался без заметного ослабления в течение нескольких суток. При обычных условиях ток в металле практически мгновенно следует за изменением внешней электрической силы, тотчас же исчезая по ее устранении.

Электролиты, т.е. водные растворы солей, кислот и щелочей, обладают гораздо меньшей проводимостью, нежели металлы, как вследствие меньшего числа подвижных зарядов (ионов) в единице объема  $N$ , так и вследствие меньшей их подвижности, т.е. большего коэффициента трения  $f$  (ср. формулу 5). При этом с повышением температуры электропроводность их не уменьшается, как у металлов, но, наоборот, увеличивается, что объясняется уменьшением коэффициента трения  $f$  вследствие уменьшения *вязкости* той жидкой среды — воды, в которой происходит движение ионов, а также увеличе-

нием степени диссоциации, т.е. числа подвижных ионов  $N$  при том же числе растворенных молекул  $N_0$ . Напомним, что эта диссоциация не вызывается, но лишь *облегчается* действием воды; причиной ее, так же как и всякого другого химического разложения, является *тепловое движение*. При постоянной температуре степень диссоциации зависит, вообще говоря, от концентрации раствора, увеличиваясь с его разбавлением, т.е. с увеличением  $N_0$  (закон Оствальда). Эта зависимость объясняется общими условиями химического равновесия (ср. XLV, ч. 2, 332 сл.). Последнее характеризуется равенством числа распадающихся молекул и числа воссоединяющихся за то же время противоположных ионов. Но для подобного воссоединения необходима встреча („столкновение“) двух ионов, а эти столкновения при данном числе их происходят тем реже, чем меньше концентрация ионов при данном общем числе, тогда как скорость диссоциации зависит только от концентрации молекул. Т. обр. при разбавлении раствора скорость диссоциации не меняется, тогда как скорость воссоединения (или „рекомбинации“) уменьшается, в результате чего равновесие смещается в сторону увеличения степени диссоциации. Впрочем, новейшие исследования (Дебая и др.) показали, что концентрация раствора влияет не только на степень диссоциации, но и на *подвижность* „свободных“ ионов. Не будучи связаны друг с другом *попарно* (как в недиссоциированных молекулах), последние оказываются все же частично связанными силами своего электростатического взаимодействия в единый коллектив. Благодаря этим силам, положительные ионы оказываются окруженными преимущественно отрицательными, а отрицательные — преимущественно положительными. Двигаясь в противоположные стороны под действием внешнего электрического поля, они, таким образом, до некоторой степени удерживают друг друга. При уменьшении концентрации раствора это взаимное торможение ионов противоположного знака должно ослабляться, а это ослабление должно влиять на проводимость таким же образом, как

и увеличение диссоциации. При малых концентрациях первое обстоятельство является во многих случаях более существенным, нежели второе, в особенности в случае так называемых „сильных“ электролитов, т.е. растворов с легко диссоциирующими молекулами, которые при больших разбавлениях можно считать нацело диссоциированными.

Прохождение электрического тока через электролит, осуществляясь в виде движения противоположно заряженных частей молекул растворенного вещества в противоположные стороны, должно сопровождаться *химическим разложением* этого вещества, или, вернее, поскольку диссоциация уже представляет собой разложение — *выделением его продуктов на границах электролита*. Подобными границами служат погруженные в него металлические пластинки (или проволоки), называемые электродами (рис. 6). Заметим, что положительная пластинка, к которой движутся положительные ионы, называется *анодом*, а отрицательная — *катодом*. Доходя до электродов, соответствующие ионы нейтрализуются (путем отдачи электронов в случае отрицательных ионов или захвата их в случае положительных). При этом они либо осаждаются на электродах в виде твердого налета образуемого ими вещества (напр., ионы металлов), либо же выделяются около них в виде пузырьков газа, либо же вступают в химическую реакцию с водой, вызывая разложение последней на водород и кислород. Из вышеизложенного ясно, что обычное представление о том, что химическое

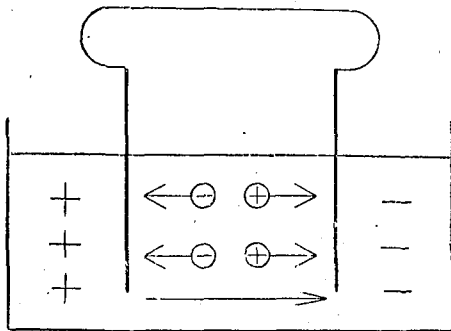


Рис. 6.



разложение в электролите „вызывается электрическим током“, вдвойне неверно. Во-первых, потому, что оно имеется в скрытой форме (диссоциация) и при отсутствии тока; и во-вторых, потому, что *выделение* продуктов разложения (ионов) вызывается той же причиной, что и ток, т.е. исходящим от электродов электрическим полем, заставляющим двигаться противоположные ионы в противоположные стороны.

В твердом состоянии гетерополярные вещества, образующие при растворении в воде электролиты, обычно рассматриваются как *изоляторы*. В действительности, однако, они также обладают некоторой, хотя при обычных условиях и весьма слабой, проводимостью, очень быстро, впрочем, возрастающей с повышением температуры. Это обстоятельство объясняется тем, что диссоциация гетерополярных частиц на ионы, поскольку она вызывается тепловым движением, должна иметь место и в твердых телах, образованных этими частицами. Необходимо, впрочем, иметь в виду, что во многих случаях сочленение гетерополярных молекул в кристаллическое тело сопровождается полной „коллективизацией“ всех ионов. Так, напр., в кристалле каменной соли положительные ионы натрия и отрицательные ионы хлора располагаются в шахматном порядке, так что каждый из них оказывается непосредственно связанным с шестью окружающими его ионами противоположного знака. В подобных случаях, поскольку понятие парной молекулы утрачивает всякий смысл, „диссоциация“ ионов сводится к отрыву их от своего нормального положения и переходу к „бродячему образу жизни“ между закрепленными (до поры до времени) ионами. Это бродяжничество диссоциированных ионов происходит очень медленно и притом одинаково по всем направлениям при отсутствии внешних сил или же преимущественно в направлении их, если они имеются налицо. Таким образом, помещая между двумя металлическими электродами пластинку „изолирующего“ вещества, мы все же получаем слабый ток, обусловленный движением

диссоциированных ионов к электродам. Этот ток, так же как и ток в водном растворе рассматриваемого вещества, сопровождается „электролизом“, т.е. выделением одного из продуктов разложения на соответствующем электроде. Законы этого электролиза в обоих случаях совершенно одинаковы: количество разложившегося вещества оказывается пропорциональным количеству прошедшего Э., а одному и тому же количеству Э. соответствуют химически эквивалентные количества разных ионов (*законы Фарадея*).

Необходимо, впрочем, заметить, что в случае большинства кристаллов (так же как и у металлов) перенос Э. осуществляется лишь частицами одного только сорта, обычно положительными ионами (т.е. как раз теми частицами, которые в случае металлов остаются неподвижными). Впрочем, при достаточно высоких температурах в проведении тока начинают принимать участие ионы обоих знаков. В некоторых кристаллах, обладающих так наз. „смешанной“ проводимостью, в ней участвуют также и „свободные“ электроны; в этом случае наряду с обычной диссоциацией имеет место *ионизация атомов путем отделения от них электронов*, переходящих к бродячему образу жизни. В отличие от металлов, где все атомы являются ионизированными, здесь мы имеем дело с частичной ионизацией, степень которой, так же как и в случае обычной диссоциации, очень сильно зависит от температуры. Зависимость эта выражается формулой вида

$$\sigma = A e^{-\frac{B}{T}}, \quad (6)$$

где  $A$  и  $B$  постоянные, а  $\sigma$  — электропроводность (которая, впрочем, является мерой не только числа, но и *подвижности* соответствующих частиц).

Электропроводность не является исключительным свойством перечисленных выше веществ. В большей или меньшей мере ею обладают все „изоляторы“. Во многих случаях она обуславливается, главным образом, содержащимися в них ионными *примесями*. Однако, и абсолютно чистые диэлектрики обладают некоторой хотя и

весьма слабой, проводимостью, причем зависимость ее от температуры выражается той же формулой (6). В тех случаях, когда эта проводимость имеет чисто электронный характер<sup>1)</sup> и достигает значительной величины уже при обычных температурах, как, напр., в случае угля, селена и др. веществ, тело называется не диэлектриком, а *полупроводником*. Как видно отсюда, различие между диэлектриками и полупроводниками имеет весьма относительный характер, завися всецело от выбора „нормальной“ температуры: при достаточно высокой температуре большинство диэлектриков становится полупроводниками, и, наоборот, при достаточно низкой температуре всякий полупроводник становится изолятором. Т. обр., в этом отношении мы имеем *существенную* разницу не между полупроводниками и диэлектриками, а между полупроводниками и *металлами*, проводимость которых с понижением температуры не понижается, но, наоборот, увеличивается. Это различие объясняется тем, что в случае металлов число бродячих электронов, будучи равно (приблизительно) числу атомов, не зависит от температуры, которая влияет лишь на их подвижность, между тем как в случае полупроводников температурой определяется самое число этих электронов. Любопытно также отметить то обстоятельство, что в то время как подвижность *ионов* (обуславливающих перенос Э. в жидких и твердых электролитах) с понижением температуры уменьшается (благодаря увеличению вязкости), подвижность бродячих электронов в металлах, а равным образом, повидимому, и в полупроводниках, при этом увеличивается. Эта особенность „свободных“ электронов объясняется тем, что своих странствований они не задерживаются у отдельных атомов, но непрерывно переходят от одного атома к соседнему. Неправильности в расположении атомов, вызываемые их тепловым движением, лишь затрудняют этот переход.

Различие между металлическими проводниками и диэлектриками имеет, впрочем, с принципиальной точки зрения также относительный характер, не по отношению к температуре, но по отношению к *давлению*. Как уже было отмечено выше, при достаточной близости между атомами любого вещества, электроны, образующие их наружную оболочку, утратили бы постоянную связь с определенными атомами и превратились бы в „бродяг“. Необходимые для такого сближения давления в случае неметаллических веществ столь велики, что они реализуются, по всей вероятности, только в недрах небесных тел под влиянием сил тяготения. Идя в противоположном направлении—увеличения расстояния между атомами и молекулами—мы приходим к *газам*, являющимся изоляторами как в случае неметаллических, так и в случае металлических веществ.

При отсутствии полной ионизации, обусловленной сцеплением соседних атомов, т.-е. давлением (внешним или „внутренним“), мы имеем, однако, в металлических парах и других газах чрезвычайно слабую ионизацию, обусловленную тепловым движением. В этом случае оторвавшиеся от атомов электроны являются свободными в полном смысле слова, но зато количество их при обычных температурах столь ничтожно (1 на  $10^{23}$  и даже более атомов), что зависящую от них проводимость можно практически не принимать в расчет. Иные условия имеют место, конечно, в газовой атмосфере Солнца и других звезд с их чрезвычайно высокой температурой, а тем более в недрах этих тел, где к температуре, как фактору ионизации, присоединяется высокое давление.

§ 3. *Электрический разряд (пробой)*. При не очень сильных электрических полях диэлектрики, так же как и металлы, подчиняются закону Ома, т.-е., другими словами, сохраняют постоянную электропроводность. Однако, при усилении поля за известные пределы последняя начинает чрезвычайно быстро возрастать, так что диэлектрики фактически превращаются в проводники. Обычно это превраще-

<sup>1)</sup> Т.-е. обуславливается исключительно оторвавшимися от отдельных атомов электронами.

ние наступает более или менее внезапно и сопровождается ярким свечением (электрическая искра); в твердых и жидких диэлектриках оно связано с сильным нагреванием, вызывающим проплавление и механическое разрушение первых и вскипание вторых. Совокупность этих явлений называется *электрическим разрядом*, или *пробоем*. Электрический пробой изоляторов весьма аналогичен механическому разрыву твердых тел под влиянием достаточно большого растягивающего усилия; при этом механическому „пределу прочности“ соответствует „пробивное напряжение“  $E_0$ , достижение или превышение которого вызывает пробой диэлектрика. В технике высоких напряжений, связанной с применением изолирующих материалов, эта величина играет такую же роль, как предел прочности в строительной технике. Заметим, что в случае обычно применяемых твердых и жидких изоляторов (стекло, фарфор, масло) пробивное напряжение составляет несколько тысяч абс. электрост. единиц на см. В случае газов оно бывает значительно меньше; так, напр., для воздуха при нормальном давлении оно равно примерно 100 (т.е. 30.000 вольт на см).

Сущность пробоя, как уже было отмечено в начале этого параграфа, заключается в резком повышении электропроводности при приближении электрического поля к некоторой критической величине  $E_0$ . Это увеличение электропроводности должно, таким образом, обуславливаться непосредственно или косвенно самим полем. Поскольку электропроводность диэлектрика определяется степенью его ионизации и подвижностью ионов (или электронов), действие поля должно заключаться в увеличении этих факторов или, по крайней мере, одного из них. Напомним для сравнения, что в области справедливости закона Ома они оказываются совершенно независимыми от присутствия поля: последнее не вызывает ионизации, но лишь подхватывает уже „готовые“ подвижные заряды, сообщая им скорость, пропорциональную своей напряженности; напомним также, что эта пропорциональность означает

пропорциональность между скоростью движения и силой трения (торможения),—пропорциональность, которая должна иметь место лишь при достаточно малых скоростях.

Наиболее изучено явление пробоя в случае газов, где оно обычно известно под именем *электрического разряда* (см. *разряд электричества в газах*). Как показал Таунсенд, действительные поля сводится в этом случае главным образом к *увеличению степени ионизации путем столкновения гонимых полем электронов и ионов с нейтральными частицами* (атомами или молекулами). Для того, чтобы подобные столкновения могли привести к ионизации, необходимо, чтобы ударяющая частица имела достаточно большую кинетическую энергию, равную или большую так называемой *ионизационной энергии*  $W_0$ , т.е. той энергии, которую нужно затратить для ионизации нейтральной частицы (путем расщепления ее на положительный ион и электрон или на два противоположных иона). В случае слабых электрических полей кинетическая энергия  $W$ , накапливаемая электронами или ионами от одного столкновения до следующего, оказывается недостаточной для ионизации ударяемых частиц; она передается им в том же самом виде, т.е. в виде кинетической энергии поступательного движения, проявляясь в *нагревании газа* (Джаулево тепло). Если же электрическая сила, действующая на электрон или ион, столь велика, что за время „свободного пробега“, т.е. от одного столкновения до следующего, он приобретает кинетическую энергию, большую или равную ионизационной энергии, то столкновение его с нейтральной частицей *может сопровождаться* в определенном проценте случаев ионизацией последней. Продукты этой ионизации тотчас же подхватываются электрическим полем и в свою очередь ионизуют при столкновениях новые частицы. Таким образом, число ионов и электронов непрерывно, лавинообразно возрастает по мере их движения, а вместе с ним возрастает и сила тока, создаваемого данным электрическим полем.

Впрочем, в ограниченном объеме газа это возрастание силы тока может происходить лишь до тех пор, пока „ионная лавина“ не докатилась до электродов, т.е. в течение очень короткого времени после включения электрического поля. Затем весьма быстро устанавливается „стационарный режим“, при котором число новообразуемых при столкновениях электронов и ионов равно числу электронов и ионов, входящих за то же самое время до электродов, где они так или иначе „выходят в тираж“; кроме того, необходимо принять в расчет электроны и ионы, взаимно нейтрализующиеся путем воссоединения (рекомбинации) в объеме газа. Таким образом, каждой величине электрического поля  $E$  соответствует определенное стационарное значение силы или *плотности* тока  $j(E)$ . То значение  $E$ , при котором эта зависимость начинает сказываться очень резко (в смысле возрастания), и представляет собой величину пробивного напряжения (или напряженности). Это значение, по существу своему не поддающееся точному определению, лежит обычно очень близко к тому начальному значению  $E_0$ , при котором начинается ионизация столкновениями и которое может быть легко определено из условия, необходимого для этой ионизации, т.е. из равенства  $W = W_0$ , где  $W_0$  — ионизационная энергия, а  $W$  — кинетическая энергия, приобретаемая электроном или ионом между двумя столкновениями.

Эта энергия должна, очевидно, равняться работе электрической силы  $eE$ , действующей на рассматриваемую частицу, на длине  $l$  ее свободного пробега. Мы получаем, таким образом, условие

$$eE_0l = W_0, \quad (7)$$

которое может служить для определения пробивного напряжения в газе.

Так как длина свободного пробега частиц газа обратно пропорциональна его плотности<sup>1)</sup>, то отсюда следует, что пробивное напряжение должно

<sup>1)</sup> Следует, впрочем, отметить, что соотношение справедливо лишь при не слишком больших скоростях.

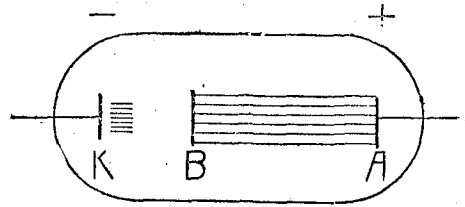
быть прямо пропорционально плотности или, что то же самое (при данной температуре), — *давлению* газа. Это соотношение между пробивным напряжением и давлением в точности подтверждается на опыте. В частности, в сильно разреженных газах „электрический пробой“ начинается при сравнительно очень слабых полях; в этом случае вместо пробоя говорят обычно об электрическом разряде — „тихом“ или „тлеющем“ (в виду сопровождающего его свечения).

В предыдущем мы совершенно не касались вопроса о происхождении и количестве тех электронов или ионов, которые являются зачинщиками процесса ударной ионизации. Вопрос этот не имеет существенного значения, подобно тому как не имеет существенного значения при исследовании процесса взрыва порохового склада вопрос о происхождении искры, его вызвавшей. Заметим лишь, что „первичная“ ионизация газа при обычных температурах обуславливается, главным образом, не тепловым движением, а действием особых ионизирующих лучей, отчасти испускаемых радиоактивными веществами, находящимися в почве и в воздухе, отчасти же приходящих из окружающего земной шар пространства (космические лучи). Если эту начальную ионизацию искусственно увеличить, напр. действием лучей радия на находящийся в разрядной трубке газ, то наблюдается зависимость силы тока от напряженности поля, изображенная на рис. 7. Здесь область  $OA$  соответствует применимости закона Ома; далее, между  $A$  и  $B$  ток достигает так наз. „насыщения“, т.е. максимальной величины, совместимой с данными условиями; он характеризуется тем, что все ионы, непрерывно образующиеся в газе благодаря действию лучей, не успевают соединиться друг с другом, относятся полем к электродам. В точке  $B$ , где кривая круто заворачивает вверх, начинается ударная ионизация, т.е. пробой или разряд.

Необходимо отметить, что зачинщиками его являются именно *электроны*, а не ионы. Это обстоятельство объясняется обычно (Таунсенд) тем,

что электроны, благодаря малости их геометрических размеров (по сравнению с ионами их можно трактовать как точки), обладают значительно большим свободным пробегом, а потому, согласно формуле (7), могут вызвать ионизацию столкновениями при значительно более слабом поле, нежели ионы. Еще, однако, большее значение, чем размеры, имеет относительная *легкость* электронов, т.е. малость их массы по сравнению с массой ионов,—в особенности в тех случаях, когда электрический разряд вызывается очень сильными полями. А именно, в то время, как массивные ионы лишь начинают разгоняться электрическим полем, легкие электроны

успевают не только разогнаться, но и проионизовать большое число атомов, многократно увеличив таким образом свою численность. Итак, в начальной фазе всякого электрического разряда в газо-



вого напряжения, а вместе с ним и область разряда перемещается в тыльную сторону. Это перемещение сопровождается обычно разветвлением, столь характерным для формы молний. Различные соображения, а также лабораторные опыты показывают, что подобное разветвление пути электрического разряда происходит всегда в сторону от положительного полюса к *отрицательному*, т.е. в сторону, обратную движению электронов.

В сильно разреженных газах оказывается возможным исследовать разряд при напряжениях, значительно превышающих пробивное. Наиболее существенной чертой подобного разряда является образование около катода *K* „темного пространства“ *KB*, за которым следует

примыкающее к аноду *A* „положительное свечение“ обычного для разряда в данном газе типа. При напряжениях, близких к пробивному, это свечение заполняет все пространство между электродами. По мере увеличения напряжения оно все более и более отодвигается от катода до тех пор, пока, наконец, катодное „темное пространство“ не заполнит всей трубки (ср. *разряд электричества в газах*, XXXV, 514/16). При этом стенки последней начинают светиться зеленоватым светом; эти явления были исследованы еще Круксом, который показал, что свечение стекла вызывается „катодными лучами“, т.е. потоком электронов, испускаемых катодом. „Темное пространство“ представляет собой область, где

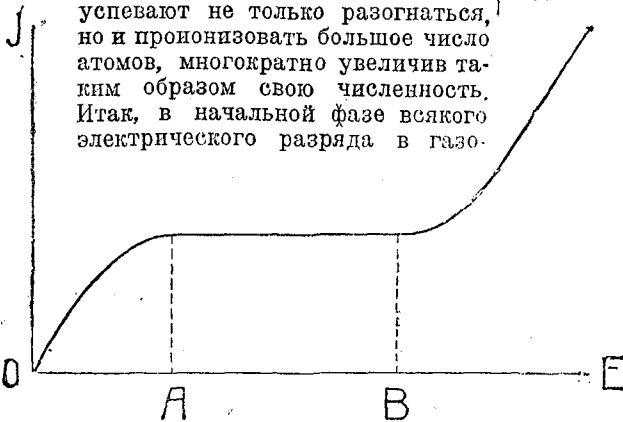


Рис. 7.

образных телах участвуют практически *одни только электроны*.

Это обстоятельство дает, между прочим, ключ к уяснению формы *грозовых разрядов*, т.е. молнии (Симпсон). Молния (см. XXIX, 221/22) не вспыхивает сразу (как это нам кажется), но представляет собой электрический разряд, который, возникнув в некоторой маленькой области, где электрическое поле достигло пробивного напряжения, быстро растет в сторону, противоположную направлению движения электронов. Это объясняется тем, что последние при своем движении обнажают положительные ионы, от которых они оторвались, и нейтрализуют положительными:

каких столкновений. Мы не имеем возможности останавливаться на более подробном рассмотрении этих явлений. Заметим лишь, что электроны вылетают не из газа, окружающего катод, но из самого катода, откуда они, по видимому, непосредственно высасываются чрезвычайно сильным полем, которое создается у его поверхности благодаря скоплению около нее положительных ионов.

В случае твердых и жидких тел наблюдение электрического разряда за пределами пробивного напряжения является практически невозможным или крайне затруднительным. Что касается величины пробивного напряжения, то оно (в противоположность случаю газов) зависит от *начальной температуры* тела. Необходимо иметь в виду, что прохождение электрического тока сопровождается *нагреванием*, которое в свою очередь вызывает увеличение электропроводности и, следовательно, силы тока (при данном внешнем поле). Это „саморазогревание“ тела при прохождении электрического тока может весьма быстро привести к пробоям. Механизм подобного пробоя, называемого „тепловым“, сводится к местному проплавлению твердого тела, т. е. образованию жидкого хорошо проводящего канала или же к местному испарению жидкости, т. е. образованию в ней ряда пузырьков пара в направлении от одного электрода к другому. Соответственно этому, пробивное напряжение жидких изоляторов при приближении их (начальной) температуры к температуре кипения стремится к нулю. В случае твердых изоляторов пробивное напряжение с повышением начальной температуры (до нескольких сот градусов Цельсия) также довольно быстро падает, достигая величины совершенно ничтожной по сравнению с нормальной.

Необходимо отметить, что одним из факторов теплового пробоя, наряду с начальной температурой, является *теплоотдача* тела, т. е. отдача выделяющейся внутри него теплоты в наружное пространство и в особенности к электродам. Чем больше теплоотдача, тем выше должна быть начальная тем-

пература, при которой данное электрическое поле может вызвать тепловой пробой.

При средних и низких температурах пробой твердых диэлектриков имеет совершенно иной характер или, вернее, подготавливается совершенно другим механизмом.

А именно, как показали новейшие исследования, дело при этом начинается так же, как и в случае газов, с вырывания электронов либо из металлического электрода в диэлектрике, либо из молекул (или атомов) самого диэлектрика. Заметим, что электронный пробой первого типа может иметь место и в пустоте. При наличии электрического поля достаточной интенсивности (порядка 100 тысяч вольт на см), стремящегося вырвать электроны из металла в вакуум, эти электроны, обычно прочно связанные с металлом, начинают на самом деле вырываться наружу и при том в количестве, чрезвычайно быстро возрастающем с увеличением напряженности поля  $E$  (а именно,

пропорционально выражению  $e - E_0^2$  где  $E_0$ —некоторое характерное для металла поле порядка миллиона вольт на см). Это явление, называемое обычно „холодной электронной эмиссией“ (в отличие от термоэлектронной эмиссии, вызываемой высокой температурой), представляет собой по существу не что иное, как „пробой вакуума“. Последний представляет собой наилучший изолятор лишь в том смысле, что электроны не могут вырываться из него самого. Если вакуум заменить диэлектриком, то, на ряду с совершенно аналогичным процессом срыва электронов из металлического электрода (служащего катодом) в диэлектрик, может иметь место—вероятно при еще больших интенсивностях электрического поля—вырывание электронов из частиц диэлектрика. Эти „первичные“ электроны, разгоняясь под действием электрического поля, могут в дальнейшем вырывать из атомов новые электроны (путем соударения, т. е. так же, как это имеет место в газах). Впрочем, независимость напряженности поля, способного пробить диэлектрик, от толщины последнего, свидетельствует о

том, что эта „ударная“ ионизация если и существует, то во всяком случае не играет существенной роли. Срыв электронов полем является, вероятно, лишь начальной стадией пробоя; вслед за электронами поле приводит в движение и ионы, при чем дальнейшее усиление тока, вероятно, осуществляется путем саморазогревания.

При пробое жидких диэлектриков существенную роль играет, повидимому, образование или выделение пузырьков воздуха или какого-нибудь другого газа, поглощенного в жидкости. Эти пузырьки, вытягиваясь в направлении поля и сливаясь друг с другом, образуют сплошной газовый путь, который пробивается легче, чем окружающая жидкость. Следует, впрочем, заметить, что вопрос о механизме пробоя жидкостей и твердых тел в настоящее время далеко еще не вполне выяснен.

§ 4. *Контактные электродвижущие силы; индукционные электростатические машины; гальванические токи; аккумуляторы.* Впредыдущем мы оставляли в стороне вопрос о происхождении тех электрических или, как их обычно называют, „электродвижущих“ сил, которыми вызываются электрические токи. Основным источником этих сил является (помимо электромагнитной индукции, которая будет рассмотрена в следующей главе) противоположная *электризация разнородных тел при соприкосновении их друг с другом.* При этом в случае проводников как „первого класса“, т. е. металлов, так и „второго класса“, т. е. электролитов, для электризации оказывается достаточным простое соприкосновение без трения, которое обычно является необходимым в случае диэлектриков: Заметим, что, исходя из некоторой хотя бы даже чрезвычайно слабой электризации, получаемой путем соприкосновения („контакта“), можно далее, пользуясь *принципом электростатической индукции* (гл. I, § 2), получить сколько угодно большое количество противоположных электричеств. На этом принципе в комбинации с так называемым принципом самовозбуждения (который применяется и в связи с электромагнитной индукцией) основаны различные *электростатические машины.*

Не останавливаясь на описании их устройства, заметим лишь, что действие их заключается в непрерывном отделении друг от друга противоположных зарядов  $\pm e'$ , полученных путем индукции с помощью ранее имевшихся зарядов  $\pm e$ , и непрерывном прибавлении первых к последним (положительного к положительному, отрицательного к отрицательному). При разделении разноименных зарядов (в первом акте), так же как и при соединении одноименных (во втором), приходится преодолевать электрические силы (притяжения или отталкивания), т. е., следовательно, совершать работу за счет энергии некоторого механического источника, переводя эту механическую энергию в электрическую энергию, накапливаемую машиной. Это накопление происходит до тех пор, пока электрическое поле между ее „полюсами“, т. е. теми местами, где скопляются противоположные заряды, не оказывается достаточным для пробоя окружающего диэлектрика (воздуха), при чем электрическая энергия превращается в тепловую. Если соединить полюса машины проводником, то в последнем получается непрерывный электрический ток, обычно чрезвычайно малой силы, в виду незначительности тех количеств электричества, которые могут быть получены (разделены) электростатическим путем. При этом, конечно, остается весьма малой и разность потенциалов между полюсами машины, определяющая электрическое поле в соединяющем их проводнике, — тем меньшей, чем больше электропроводность последнего.

Несравненно более сильные токи могут быть получены без применения механической работы за счет химической энергии путем соединения нескольких разнородных проводников (среди которых при этом непременно должны присутствовать электролиты, см. ниже) в *замкнутую цепь.* Происхождение подобных токов, называемых *гальваническими* (см. *гальванизм*), станет нам понятным, если мы рассмотрим внимательно явления, происходящие при контакте двух разнородных проводников. Явления эти сводятся с внешней стороны к противо-

положительной их электризации, т. е. к переходу некоторого электрического заряда определенного знака с одного проводника на другой. Заряд этот переходит, конечно, не сам по себе, но переносится материальными частицами — электронами или ионами, — которые устремляются от одного проводника к другому вследствие *каких-то сил, действующих на них в пограничном слое*. Каковы бы ни были эти силы, они, однако, скоро уравниваются электрическими силами, появляющимися в этом слое, вследствие противоположной электризации соприкасающихся в нем проводников. Форма и размеры последних при этом, очевидно, не имеют значения. Мы можем поэтому сосредоточить свое внимание на пограничном слое. Здесь мы имеем некоторое электрическое поле  $E$ , действующее на протяжении весьма малого расстояния  $d$ . Точное знание того, каким образом это поле распределено в толще слоя, т. е. на отрезке  $d$ , не имеет существенного значения. Практически существенной величиной является лишь соответствующая ему *разность потенциалов*, называемая *контактной разностью потенциалов*, или контактным „скачком“ потенциала. Этот скачок потенциала  $\Delta V = V_1 - V_2$ , равный произведению среднего значения  $E$  на  $d$ , представляет собой меру той контактной „электродвижущей силы“, которая гонит заряды из одного проводника в другой. Обозначая ее через  $\varphi_{1,2}$  мы можем, следовательно, положить

$$\varphi_{1,2} = V_1 - V_2,$$

при чем  $\varphi_{2,1} = V_2 - V_1 = -\varphi_{1,2}$ . Если рассматриваемые проводники не соединены ни с какими другими проводниками, то в состоянии равновесия электрическое поле внутри каждого из них, помимо их контактного слоя, исчезает. Это значит, что потенциал каждого из них принимает постоянную величину, отличную от потенциала соседа. Эти потенциалы мы можем подразумевать под величинами  $V_1$  и  $V_2$  в предыдущей формуле.

То же самое получается и в более сложном случае *замкнутой* цепи, составленной из нескольких проводников. Считая потенциал первого звена  $V_1$

заданным (он может быть выбран произвольно), мы получаем для всех последующих звеньев вполне определенные потенциалы, связанные друг с другом соотношениями  $V_2 - V_1 = \varphi_{2,1}$ ,  $V_3 - V_2 = \varphi_{3,2}$  и т. д. Разность потенциалов между крайними звеньями  $\varphi$ , равная алгебраической сумме контактных электродвижущих сил  $\varphi_{2,1} + \varphi_{3,2} + \dots$ , *зависит, при этом*, вообще говоря, от *промежуточных* звеньев. Это обстоятельство остается справедливым и в частном случае цепи, конечные звенья которой одинаковы. Смыкая их друг с другом, мы не должны иметь скачка потенциала между ними. А между тем, при том распределении потенциала, которое соответствовало разомкнутому состоянию цепи, подобный скачек потенциала должен был бы иметь место. Отсюда следует, что в рассматриваемой нами замкнутой цепи, для которой сумма контактных электродвижущих сил (определяемых как скачки потенциала при обходе цепи в определенном направлении) отлична от нуля, *равновесное распределение электрического заряда невозможно*. Поскольку замкнутость цепи не может влиять на скачки потенциала между соседними ее звеньями, потенциал внутри каждого из них должен изменяться таким образом, чтобы, обойдя цепь в надлежащем направлении, мы получили ту же самую сумму скачков или, как говорят, ту же самую *результатирующую электродвижущую силу*  $\varphi$ , как и в том случае, если эта цепь была разомкнута. Таким образом, в звеньях замкнутой цепи, помимо „поверхностного“ электрического поля в контактном слое между соседними звеньями, должно иметься обыкновенное „объемное“ электрическое поле, а следовательно и неизменный спутник его — электрический ток.

При невозможности *равновесного* состояния в замкнутой цепи устанавливается в этом случае *стационарное* состояние, характеризуемое *неизменным* (во времени) распределением потенциала, а следовательно и тока. Это стационарное распределение, характеризующееся постоянством тока во времени, требует также неизменности си-



лы тока в пространстве, точнее — *одинаковости тока для любого поперечного сечения цепи*. При несоблюдении последнего условия в отрезке цепи, ограниченном двумя произвольно взятыми поперечными сечениями, происходило бы непрерывное накопление  $\mathcal{E}$  того или иного знака, что несовместимо с постоянством электрического потенциала во времени.

Таким образом, в случае замкнутой цепи с отличной от нуля результирующей электродвижущей силой  $\varphi$  мы получаем постоянный электрический ток, вполне определенной, т. е. независимой от выбора поперечного сечения, силы  $i$ . Легко видеть, что последняя должна быть прямо пропорциональна первой. Этот результат, обычно известный под именем *закона Ома*, непосредственно следует из той элементарной формы закона Ома, которая была приведена в § 1 (уравнение 4). Его обычно пишут в виде

$$i = \frac{\varphi}{R} = \frac{V' - V''}{R}, \quad (8)$$

где  $R$  обозначает коэффициент пропорциональности, называемый *сопротивлением*, или „омическим сопротивлением“ цепи, а  $V' - V''$  означает ту разность потенциалов, которая получилась бы на концах рассматриваемой цепи, если бы ее разомкнули, разорвав одно из звеньев.

Сопротивление  $R$  зависит от удельного сопротивления каждого из звеньев цепи  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ , а также, конечно, от его размеров и формы. Контактные слои не играют при этом никакой роли, обуславливая лишь те слагаемые, из которых составляется электродвижущая сила. Считая, что в каждом из этих слоев ток имеет направление, перпендикулярное к ограничивающим его параллельным поверхностям, мы можем трактовать эти поверхности как *экипотенциальные* и говорить об определенной разности потенциалов на „концах“ каждого звена цепи. Обозначая эту разность потенциалов для  $n$ -го звена через  $V_n' - V_n''$  (где  $V_n'$  представляет собой потенциал на одном конце, а  $V_n''$  на другом), мы можем по-

$$i = \frac{V_n' - V_n''}{R_n},$$

подразумевая под коэффициентом  $R_n$  сопротивление проводника, образующего рассматриваемое звено<sup>1)</sup>.

Отсюда следует  $\Sigma n (V_n' - V_n'') = i \Sigma R_n$ , или, так как сумма  $V_1' - V_1'' + V_2' - V_2'' + \dots$  совпадает с суммой скачков потенциала  $V_2' - V_1'' + V_3' - V_2'' + \dots = \varphi$ ,

$$i = \frac{\varphi}{\Sigma R_n}. \quad (9)$$

Сравнивая эту формулу с (8), мы видим, что общее сопротивление цепи равно сумме сопротивлений отдельных звеньев

$$R = \Sigma R_n. \quad (10)$$

Далее легко показать, что количество тепла  $Q_n$ , выделяющегося в  $n$ -ом звене за единицу времени, выражается формулой

$$Q_n = i (V_n' - V_n''), \quad (11)$$

которую можно также переписать в виде

$$Q_n = \frac{(V_n' - V_n'')^2}{R_n} = i^2 R_n. \quad (12)$$

Для этого рассмотрим слой проводника, ограниченный двумя весьма близкими экипотенциальными поверхностями, и разобьем его на призматические элементы, ограниченные двумя противолежащими участками этих поверхностей. Обозначая площадь одного из этих участков через  $dS$ , а расстояние между ними через  $dl$ , мы получаем для объема соответствующего элемента выражение  $dS \cdot dl$ , а для количества тепла  $dQ$ , выделяющегося в нем за единицу времени, согласно формуле (6) § 1,

$$dQ = E j dS dl.$$

Принимая во внимание, что произведение  $E dl = dV$  представляет собой разность потенциалов на краях слоя, а произведение  $j dS = di$  — силу тока, проходящего через рассматриваемый участок его поверхности, мы получаем для теплоты, выделяющейся во всем слое, выражение  $i dV$ , а следовательно для всех слоев в  $n$ -ом проводнике

$$i \Sigma dV = i (V_n' - V_n'').$$

<sup>1)</sup>  $R_n$  зависит только от свойств  $n$ -го проводника и остается неизменным при включении его в другую цепь.

Сумма теплоты  $Q_n$  для всех звеньев цепи представляет собой общее количество теплоты  $Q$ , в ней выделяющейся, если пренебречь незначительными тепловыми эффектами, могущими иметь место в контактных слоях (см. след. параграф). Мы имеем, следовательно, в виду  $\sum (V'_n - V''_n) = \varphi$  (э.-д. сила),

$$Q = i\varphi = \frac{\varphi^2}{R} = i^2 R. \quad (13)$$

Эта формула представляет собой обычное выражение закона Джоуля.

Заметим, что цепь проводников, способная при замыкании давать электрический ток, т.-е. обладающая исчезающей электродвижущей силой, называется вообще говоря *гальваническим элементом* (см. XII, 419 сл.). Как будет показано ниже, подобная цепь не может быть составлена из одних лишь металлических проводников (если только температура их одинакова, см. след. §), но должна содержать хотя бы одно электролитическое звено. Прохождение электрического тока через это звено сопровождается не только выделением тепла, но и выделением продуктов электролиза на его краях (электродах). В результате происходит постепенное изменение *контактного скачка потенциала на этих краях* и притом с стороны, соответствующую уменьшению электродвижущей силы (э.-д. с.), а следовательно и силы тока. Это явление называется *электролитической поляризацией*. Оно представляет собой непосредственное следствие того общего принципа, согласно которому всякая система, будучи предоставлена самой себе, *постепенно приходит к состоянию равновесия*, если последнее первоначально отсутствовало, как это имеет место в случае замкнутой системы проводов с исчезающей э.-д. силой. Т. обр., электрический ток, протекающий в подобной системе, не является *воплне* стационарным, как это предполагалась выше. В действительности, следуя за изменением э.-д. силы, он постепенно ослабевает. Заметим, что уменьшение э.-д. силы гальванического элемента обычно интерпретируется как результат возникновения, вследствие прохождения тока, *электродвижущей силы противоположного*

*направления*, т. наз. поляризационной э.-д. силы. Последняя появляется при прохождении тока через всякий электролит и может в свою очередь служить источником электрического тока, если электролит выделить из цепи и соединить электроды металлическим проводом. На этом принципе основаны приборы, называемые *электрическими аккумуляторами* (см. I, 585 сл.). Аккумулятор представляет собой, в сущности, не что иное как гальванический элемент, электродвижущая сила которого создается путем предварительного пропускания электрического тока, питаемого каким-нибудь внешним источником („зарядка“). От хорошего аккумулятора требуется, чтобы при „разрядке“ э.-д. сила оставалась практически постоянной в течение возможно более длительного времени по отношению к общей длительности его действия.

§ 5. *Контактные разности потенциалов между металлами; термоэлектрические токи.* Механизм контактной электризации металла и электролита сводится, с одной стороны, к переходу некоторого числа положительных ионов металла в раствор, а с другой — к переходу некоторого числа ионов растворенного вещества на металл. Таким образом, контактный скачок потенциала между металлом и электролитом зависит существенным образом от *взаимоотношения* между ними.

Проще обстоит дело в случае соприкосновения *двух различных металлов друг с другом*. В этом случае электризация обуславливается переходом небольшого числа „бродячих“ электронов от одного металла к другому, при чем контактная разность потенциалов может быть определена непосредственно из условия равенства потенциальной энергии электронов в обоих металлах, после установления равновесия.

Обозначим работу, которую нужно затратить для того, чтобы вырвать один из бродячих электронов из данного металла наружу, через  $U$ . Считая эти электроны совершенно свободными до тех пор, пока они находятся *внутри* металла, мы можем отнести работу  $U$  за счет сил, действующих на них в *поверхностном*

слое последнего. Величину  $-U$  мы можем при этом трактовать как *эффективную потенциальную энергию* электрона в металле по отношению к пустоте<sup>1)</sup>, а величину  $\frac{-U}{e} = \varphi (> 0)$ , где  $-e$

заряд электрона, как *эффективный* внутренний потенциал металла при наружном потенциале  $= 0$ , или как *контактный скачок* потенциала при переходе из пустоты в данный металл.

При соприкосновении двух разных металлов электроны будут переходить от того из них, где их потенциальная энергия меньше, т.е. где потенциал  $\varphi$  больше, к другому, где он меньше, до тех пор пока *внутри* обоих металлов не установится один и тот же потенциал. Обозначая скачки потенциала у первого и у второго металла соответственно через  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , а дополнительные потенциалы, приобретаемые ими при соприкосновении друг с другом (и обнаруживающиеся не только внутри них, но и во внешнем пространстве), через  $V_1$  и  $V_2$ , мы можем записать условие равновесия электронов в виде  $\varphi_1 + V_1 = \varphi_2 + V_2$  или

$$V_1 - V_2 = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (14)$$

Таким образом, контактная разность потенциалов между двумя металлами  $V_1 - V_2$ , или—что то же самое—*электродвижущая сила*  $\varphi_{1,2}$ , измеряемая этой разностью потенциалов, *представляется в виде разности значений двух величин*  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , *характерных для каждого из металлов в отдельности*. Следует подчеркнуть, что это соотношение является отличительным признаком металлических проводников и что оно не имеет места для контактных э.-д. сил между металлами и электролитами.

Из предыдущего соотношения следует, что в цепи, составленной из нескольких металлов, разность потенциалов между крайними звеньями не зависит от числа и природы проме-

жуточных (закон Вольты). В самом деле, напр. в случае трех металлов мы имеем в качестве условий равновесия цепь равенств  $V_1 + \varphi_1 = V_2 + \varphi_2 = V_3 + \varphi_3$ , из которой следует, что  $V_3 - V_1 = \varphi_1 - \varphi_3$ , совершенно независимо от  $\varphi_2$ .

В частности, при одинаковости конечных звеньев разность потенциалов между ними равна нулю. Соединяя эти звенья друг с другом, мы получим *замкнутую цепь* с исчезающей электродвижущей силой. Таким образом, в замкнутой цепи, составленной исключительно из металлических проводников, стационарный электрический ток не может иметь места (см., впрочем, ниже).

Мы уже указывали в первой главе (§ 3), что раскаленные металлы испускают электроны. Это испускание представляет собой не что иное как испарение. Скорость *всякого* процесса испарения, т.е. число  $n$  частиц, испаряющихся в единицу времени, зависит от абсолютной температуры испаряющегося тела по формуле

$$n = AT^a e^{-\frac{U}{kT}}, \quad (15)$$

где  $A$ ,  $a$  и  $U$ —постоянные. При этом последняя ( $U$ ) представляет собой „скрытую теплоту испарения“, относенную к одной частице, т.е., другими словами, работу, которую нужно затратить для отрывания одной частицы от рассматриваемого тела. Показатель  $a$  зависит от рода тела, точнее — от теплоемкости его, и близок по порядку величины к 1.

Предыдущая формула, как показал *Ричардсон*, применима и к электронному испарению, скорость которого может быть легко измерена по силе  $i$  соответствующего „термо-ионного“ или, лучше, „термо-электронного“ тока. Заметим, что для предупреждения обратного процесса конденсации электронов, т.е. возвращения их в исследуемый металл, их необходимо „отсасывать“ внешним электрическим полем. Для этого раскаленный металл присоединяется к отрицательному полюсу гальванического элемента и помещается в непосредственной близости к холодному металлическому

<sup>1)</sup> Слово „эффективный“ указывает на то обстоятельство, что энергию  $U$  можно было бы считать потенциальной лишь при одинаковости *кинетической* энергии электронов внутри и вне металла. В действительности последнее условие не соблюдается, ибо внутри металла „свободные“ электроны находятся в очень быгом движении, которое не учитывается при обычном определении работы вырывания  $U$ .

электроду, соединенному с положительным полюсом. Воздух из сосуда, содержащего оба электрода, удаляется. Мы получаем, таким образом, простейшую *катодную лампу* (см. *электронная лампа*) или электронную трубку

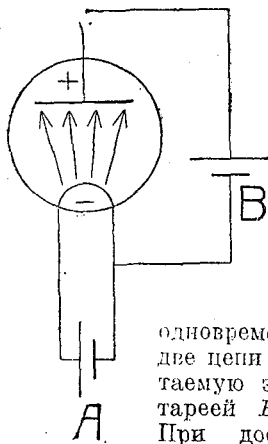


Рис. 9.

с накаливаемым катодом (рис. 9). Нагревание последнего производится обычно путем пропускания специального тока от вспомогательного элемента (или батареи) *A*. Таким образом, катод оказывается

одновременно включенным в две цепи — «цепь анода», питаемую элементом или батареей *B*, и цепь накала. При достаточно большой электродвижущей силе в цепи анода, сила тока в этой

цепи достигает предельной величины, при которой всякий испаряющийся из катода электрон попадает на анод. Эта предельная сила тока, зависящая только от температуры катода, равна произведению заряда электрона на число электронов, испаряющихся в единицу времени. Зависимость ее от температуры в точности выражается формулой (15) при  $\alpha = 2$  (что, как показывает термодинамический вывод, соответствует исчезающе малой теплоемкости электронов внутри металла).

Согласно вышесказанному, энергия испарения электрона  $U$ , деленная на его заряд, должна равняться эффективному потенциалу металла  $\phi$ . Опыт показывает, что разность вычисленных таким образом эффективных потенциалов для *различных* металлов совпадает с непосредственно измеренной контактной разностью потенциалов между ними, в согласии с формулой (14). Следует, впрочем, заметить, что эта формула может считаться *вполне точной* лишь при *абсолютном нуле температуры*, ибо только в этом случае равновесие свободных электронов определяется равенством потенциальной энергии их в обоих металлах, т.е.

равенством нулю электрической силы в переходном слое. При всякой иной температуре оказывается необходимым учитывать *давление*, производимое электронами. Рассматривая совокупность последних как *идеальный газ*, подчиняющийся классической статистике Максвелла-Больцмана, мы можем определить величину этого давления известной формулой кинетической теории:

$$p = nkT, \quad (16)$$

где  $n$  обозначает концентрацию, т.е. число электронов в единице объема. Если эта концентрация изменяется в направлении от одного металла к другому, то на бесконечно малом отрезке мы получаем разность давлений

$\frac{dp}{dx} dx = kT \frac{dn}{dx} dx$ . В состоянии равновесия эта разность давлений должна уравниваться электрической силой, отнесенной к единице объема, которую можно представить в виде произведения —  $n \frac{dW}{dx}$ , где  $W$  потенциальная энергия одного электрона. Мы имеем, таким образом, уравнение

$$-\frac{dW}{dx} = kT \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} = kT \frac{d}{dx} \ln n$$

( $\ln n$  обозначает натуральный логарифм  $n$ ) или, переходя от бесконечно малых изменений  $W$  и  $n$  на бесконечно малом отрезке  $dx$  к конечным изменениям этих величин при переходе от одного металла к другому,

$$W_1 - W_2 = kT \ln n_2 - kT \ln n_1 = kT \ln \frac{n_2}{n_1}, \quad (17)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  обозначают концентрации электронов в обоих металлах. Эти концентрации можно рассматривать как характерные для соответствующих металлов постоянные, так как они изменяются совершенно неощутимым образом при переходе небольшого числа электронов от одного металла к другому. Заметим, что формула может быть переписана в виде равенства  $\frac{n_2}{n_1} = e^{-\frac{w_2}{kT}} \cdot e^{\frac{w_1}{kT}}$ , определяющего равновесное распределение свободно движущихся частиц в любом внешнем поле, где они имеют потенциальную энергию  $W$ .

В рассматриваемом случае мы имеем  $W_1 = -e(V_1 + \phi_1)$  и  $W_2 = -e(V_2 + \phi_2)$ .

Таким образом, мы получаем следующее выражение для контактной разности потенциалов двух разных металлов:

$$V_1 - V_2 = \varphi_2 - \varphi_1 + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} \quad (18)$$

(при чем заряд электрона обозначен через  $-e$ ).

Второй, зависящий от температуры, член в этой формуле чрезвычайно мал по сравнению с первым, так что практически при измерении контактной разности потенциалов он не играет роли.

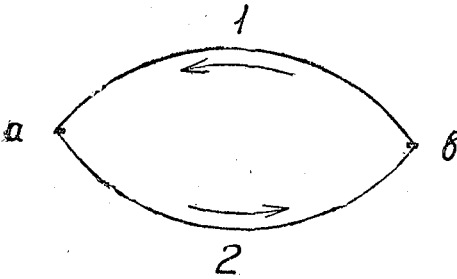


Рис. 10.

Положение, однако, меняется, когда мы имеем дело с замкнутой цепью нескольких металлов, различные сочленения или „спай“ которой имеют разную температуру. В этом случае сумма скачков потенциала при обходе всей цепи в одном определенном направлении, вообще говоря, не исчезает; согласно формуле (16) она должна сводиться к сумме малых „температурных“ членов  $\frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}$ .

Так, напр., в простейшем случае двух металлических проводов 1 и 2, спай которых  $a$  и  $b$  (рис. 10) имеют разную температуру  $T_a$  и  $T_b$ , алгебраическая сумма скачков потенциала при обходе цепи в направлении, указанном стрелкой, т. е. разность

$$\varphi = (\varphi_1^a - \varphi_2^a) - (\varphi_1^b - \varphi_2^b),$$

оказывается равной

$$\varphi = \frac{k(T_a - T_b)}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}. \quad (19)$$

В результате, в подобной замкнутой цепи, при неодинаковости температуры обоих спаев ( $T_a$  и  $T_b$ ), получается электрический ток, сила которого пропорциональна результирующему скач-

ку потенциала  $\varphi$ . Этот ток называется термоэлектрическим<sup>1)</sup>, а величина  $\varphi$  называется термоэлектродвижущей силой (см. термоэлектричество).

Наличие термоэлектрического тока означает, что „свободные“ электроны не могут распределиться равновесным образом при неодинаковости температуры своих спаев. Так как, однако, всякая система, будучи предоставлена самой себе, постепенно переходит в состояние теплового равновесия, то мы должны ожидать, что прохождение термоэлектрического тока должно сопровождаться уменьшением той разности температуры, которой он вызывается, т. е., другими словами, охлаждением более горячего и нагреванием более холодного спаев. Поддерживая температуры  $T_a$  и  $T_b$  постоянными, мы должны, следовательно, наблюдать в горячем спае поглощение и в холодном — выделение тепла. Этот эффект был обнаружен на опыте Пельтье и известен под его именем. Его легко вывести непосредственно, рассматривая условия прохождения „свободного“ электрона через спай двух металлов. В самом деле, энергия электрона изменится при этом на величину  $\pm (W_1 - W_2) = \mp e(V_1 + \varphi_1 - V_2 - \varphi_2)$ , равную, согласно формуле (16),  $\pm \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1}$ , где знак  $+$  или  $-$  зависит от того или иного направления перехода. Это изменение энергии и обнаруживается в виде выделения тепла — в случае ее уменьшения, или поглощения его — в случае ее увеличения (теплота Пельтье). Следует заметить, что в однородном проводнике, разные части которого имеют разные температуры, также возникают разности электрических потенциалов; однако, они не влияют на результирующую силу тока, вызывая лишь добавочные тепловые эффекты вдоль проводника (эффект Томсона).

Рассмотренный нами случай замкнутой цепи из двух металлических проводов представляет собой простейший пример получения постоянного тока с помощью электродвижущей силы в

<sup>1)</sup> Его не следует смешивать с термоэлектронным током, получающимся при испарении электронов в вакууме.

замкнутом контуре (цепи). Следует заметить, что величина и температурная зависимость термоэлектродвижущей силы  $\varphi$  оказывается на опыте отличной от теоретической (19). Различие это обуславливается тем, что свободные электроны в металле нельзя трактовать как классический идеальный газ. Более строгая теория, развитая недавно *Зоммерфельдом* на основе новой статистики Паули-Ферми, приводит к формуле для  $\varphi$ , находящейся в полном согласии с опытом.

§ 6. Измерительные приборы и единицы измерения. До сих пор мы совершенно не касались вопроса о методах измерения тех величин, которые встречаются в учении об электрическом токе: силы тока, электродвижущей силы и сопротивления.

Один из простейших методов измерения силы тока основывается на законе Фарадея о пропорциональности этой силы весовому количеству вещества, выделяющегося на электродах в единицу времени при пропускании тока через какой-нибудь электролит. Основанные на этом принципе приборы называются *вольтметрами*<sup>1)</sup>.

Для измерения электродвижущих сил служат приборы, называемые *электрометрами* или *вольтметрами*. Они основываются либо на измерении электрических сил между двумя проводниками, соединенными с противоположными полюсами разомкнутой цепи, служащей источником э.-д. силы, либо на измерении силы тока, создаваемой рассматриваемой э.-д. силой в проводнике с данным предварительно измеренным сопротивлением, либо, наконец, на измерении теплового эффекта в подобном проводнике.

Что касается, наконец, сопротивления, то оно обычно измеряется путем сравнения с каким-нибудь „эталоном“, т. е. заранее измеренным сопротивлением. Абсолютное определение последнего сводится в конце концов к самостоятельному измерению э.-д. силы и силы тока и вычислению отношения между ними. Наиболее употребитель-

ным прибором для относительного измерения сопротивлений служит так наз. *мостик Уитстона*.

Он представляет (рис. 11) собой провод  $MN$ , разветвляющийся в точках  $A$  и  $C$ . Одна ветвь  $ABC$  состоит из однородного провода со скользящим кон-

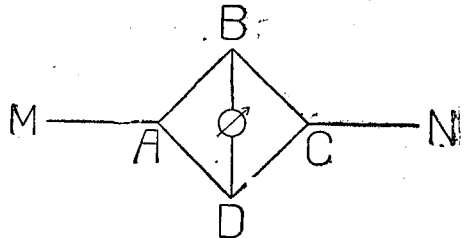


Рис. 11.

тактом  $B$ ; другая  $ADC$  — из измеряемого сопротивления  $AD$  и эталонного  $DC$ . Точки  $B$  и  $C$  соединяются перемычкой, содержащей измеритель силы тока. Контакт  $B$  передвигают до тех пор, пока ток в  $BD$  не исчезает. При этом отношение сопротивлений  $AD$  и  $DC$  должно равняться отношению сопротивлений  $AB$  и  $BC$ , которое непосредственно равно отношению длины  $AB$  к длине  $BC$ .

Предыдущий результат непосредственно вытекает из простых соотношений (так наз. *законов Кирхгофа*), характеризующих распределение тока и потенциала в разветвленной сети линейных проводов. Это соотношение сводится к тому, что сумма токов, притекающих по разным проводам к точке, где они встречаются, равна нулю и что разность потенциалов при обходе вдоль замкнутого контура, не содержащего э.-д. сил, равна нулю.

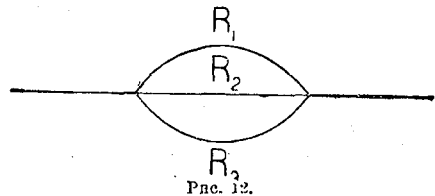


Рис. 12.

С помощью приведенных соотношений нетрудно далее показать, что сопротивление  $R$  нескольких последовательно включенных проводов равно сумме их сопротивлений:  $R_1 + R_2 + \dots$ , тогда как при „параллельном“ их включении путем разветвления (рис. 12)

<sup>1)</sup> Более распространенными измерителями силы тока являются так называемые гальванометры и амперметры, основанные на магнитных действиях тока (см. XII, 451/64, и *электротехника*).

складываются не их сопротивления, а обратные величины, т. е. *проводимости*:

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

Путем последовательного или параллельного соединения нескольких разомкнутых гальванических цепей получаются гальванические (или аккумуляторные) батареи (см. XII, 439/41). Не останавливаясь подробнее на этих не имеющих принципиального значения вопросах, мы рассмотрим в заключение вопрос о тех *единицах*, которыми пользуются на практике для измерения э.-д. сил токов и сопротивлений (см. XII, прил. *единицы измерений*, 6/8). Практической единицей э.-д. силы, или разности потенциалов, служит *вольт*, равный  $\frac{1}{300}$  электростатической единицы разности потенциалов. Соответственным образом уменьшается и единица напряженности электрического поля, определяемая как градиент потенциала в 1 вольт на см. Практической единицей электрического заряда и силы тока служат соответственно *кулон* и *ампер*, равные  $3 \cdot 10^9$  электростатич. единиц заряда и силы тока. Практическая единица сопротивления определяется как такое сопротивление, при котором э.-д. сила в 1 вольт дает ток в 1 ампер. Эта единица сопротивления называется *омом*. Заметим, что контактные э.-д. силы имеют обычно порядок 1 вольта.

Удельное сопротивление  $\rho$  разных металлов (равное обратной величине их электропроводности  $\sigma$ ) колеблется обычно при нормальных температурах в пределах от одной стотысячной до одной миллионной ома. Сопротивление  $R$  металлического стержня с длиной  $l$  и сечением  $S$  может быть вычислено из удельного сопротивления  $\rho$  по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Таким образом, в случае провода с сечением в 1 кв. мм =  $10^{-2}$  кв. см мы получим сопротивление в 1 ом при длине порядка 10—100 метров. В случае ртути, имеющей исключительно большое сопротивление, эта длина близка к 1 метру. Громадность тех количеств

электричества, которые перемещаются в металлах при прохождении электрических токов под влиянием весьма незначительных электрических сил, объясняется тем, что при этом используются все скрытые в проводах резервы подвижных электрических зарядов, между тем как в электростатических явлениях обнаруживаются лишь ничтожные части этих резервов.

В непосредственной связи с практическими единицами заряда, тока и потенциала находятся практические единицы работы и мощности. Практическая единица работы называется *джоулем*; ее можно определить как работу, совершаемую при прохождении зарядом в 1 кулон падения потенциала в 1 вольт. Другими словами, это есть работа, совершаемая в 1 секунду электродвижущей силой в 1 вольт в цепи, по которой течет ток в 1 ампер. Эта работа эквивалентна количеству теплоты, равному 0,24 малых калорий. Мощность, при которой в 1 секунду совершается работа в 1 джоуль, называется *ваттом*. На практике обычно пользуются в 1000 раз большей единицей, называемой киловаттом и близкой к механической единице мощности—лошадиной силе. Впрочем, следует заметить, что приставки кило, милли и т. д. применяются не только к ватту, но равным образом и к другим электрическим единицам для обозначения в 1000 раз больших или в 1000 раз меньших единиц (напр. 1 киловольт обозначает 1000 вольт, один миллиампер — 0,001 ампера). На практике в качестве единицы энергии часто потребляется так называемый «ватт-час», т. е. энергия, выделяющаяся в течение часа при мощности в 1 ватт. Эта энергия равна 3.600 джоулей.

Наконец, следует упомянуть, что практической единицей емкости служит емкость проводника, который при заряде в 1 кулон получает потенциал в 1 вольт. Эта единица, равная  $9 \cdot 10^{11}$  см, называется *фарадой*. Обычно емкость измеряется в микрофарадах (=  $9 \cdot 10^6$  см).

Глава III. Электромагнитные явления и магнетизм. § 1. Взаимодействие движущихся электрических зарядов (электрокинетические действия). Вза-

взаимодействие заряженных частиц не ограничивается кулоновскими силами притяжения и отталкивания. В том случае, когда эти частицы движутся, к электрическим силам, зависящим только от их *положения*, присоединяются так назыв. *электрокинетические силы*, пропорциональные *электрическим количествам движения*, т.е. произведению заряда каждой частицы на ее скорость. От положения частиц электрокинетические силы зависят совершенно так же, как и электростатические, т.е. они убывают с расстоянием обратно пропорционально его квадрату. Кроме того, однако, они зависят определенным образом от *направления движения* (скорости) каждой из двух взаимодействующих частиц, т.е. от углов, образуемых их скоростями (электр. количествами движения) друг с другом и с соединяющей их прямой.

Таким образом, электрокинетическая сила  $f_{12}$ , действующая со стороны одной частицы (1) на другую (2), может быть выражена формулой

$$f_{12} = \frac{e_1 v_1 \cdot e_2 v_2}{r_{12}^2} \psi(\theta_{12}, \theta_1, \theta_2), \quad (1)$$

где  $e_1$  и  $v_1$  — заряд и скорость движения первой частицы,  $e_2$  и  $v_2$  — те же величины для второй,  $r_{12}$  — их взаимное расстояние<sup>1)</sup>, а  $\psi$  — некоторая функция от угла  $\theta_{12}$  между векторами  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$ , угла  $\theta_1$  между  $\vec{v}_2$  и  $\vec{r}_{12}$  и  $\theta_2$  между  $\vec{v}_1$  и  $\vec{r}_{12}$ .

Формула (1) характеризует — и то весьма неполным образом (поскольку функция  $\psi$  остается неопределенной) — лишь *величину* силы  $f_{12}$ . Что касается ее *направления*, то оно определяется довольно сложным образом через направления векторов  $\vec{v}_1$ ,  $\vec{v}_2$  и  $r$ . А именно, сила  $f_{12}$  оказывается перпендикулярной к вектору  $\vec{v}_2$ , т.е. к направлению движения той частицы, на которую она действует, и лежит в плоскости, содержащей векторы  $\vec{v}_1$  и  $\vec{r}_{12}$ , т.е. скорость частицы, от которой

она исходит, и расстояние между обеими частицами.

В простейшем случае, когда последние движутся совместно, т.е. с одинаковой по величине и направлению скоростью  $\vec{v}_1 = \vec{v}_2 = \vec{v}$ , и притом таким образом, что соединяющая их прямая  $r_{12}$  перпендикулярна к направлению их движения (рис. 13), электрокинетические силы  $\vec{f}_{12}$  и  $\vec{f}_{21}$ , с которыми они действуют друг на друга, приобретают характер обычного ку-

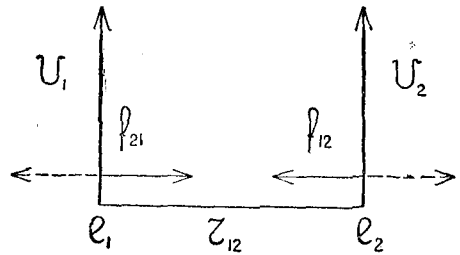


Рис. 13.

лоновского притяжения или отталкивания, направленного вдоль прямой  $r_{12}$  и равного

$$f_{12} = - \frac{e_1 e_2}{r_{12}^2} \frac{v^2}{c^2}, \quad (2)$$

где  $\frac{1}{c^2}$  — коэффициент пропорциональности, равный численному значению углового множителя  $\psi$  в (1) при  $\theta_{12} = 0$  и  $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$ .

В случае одноименных зарядов сила (2) имеет характер взаимного притяжения, а в случае разноименных — характер взаимного отталкивания. Таким образом, в обоих случаях *электрокинетическое взаимодействие имеет направление прямо противоположное электростатическому* — это обстоятельство выражается отрицательным знаком в формуле (2). Коэффициент  $c$  обладает размерностью скорости и может быть определен как такая скорость движения обоих зарядов  $v = c$ , при которой электрокинетическое взаимодействие их в точности уравновешивает электростатическое. Опыт показывает, что коэффициент  $c$  равен

$3 \cdot 10^{10} \left( \frac{\text{см}}{\text{сек.}} \right)$ , т.е. совпадает со скоро-

1) Которое мы будем представлять себе в виде вектора, проведенного от 1-й частицы ко второй.



стью распространения света в пустоте. Значение этого совпадения станет нам яснее в дальнейшем. Здесь мы отметим лишь то обстоятельство, что на опыте скорость движения материальных частиц никогда не достигает „критической“ скорости  $c$ . Поэтому, фактически, электрокинетическая сила (2) может лишь ослаблять электростатическую  $\frac{e_1 e_2}{r^2}$ , но не уравнове-

шивать, а тем более перевешивать ее.

Далее, необходимо подчеркнуть, что как в формуле (2), так и в более общей формуле (1), под скоростями  $\vec{v}_1$  и  $\vec{v}_2$  подразумеваются скорости обеих частиц по отношению к наблюдателю, т.е. по отношению к некоторой системе координат, принимаемой за неподвижную. Выбор этой системы координат остается в значительной мере произвольным, что связано с относительным характером движения и, в частности, скорости прямолинейного и равномерного движения (см. ниже гл. IV).

Наконец, нужно отметить тот факт, что электрокинетические силы, в противоположность электростатическим, не удовлетворяют принципу равенства и противоположности действия и противодействия. Это видно уже из того обстоятельства, что скорости двух действующих друг на друга частиц входят в выражение электрокинетической силы, испытываемой каждой из них, несимметрическим образом. Если, однако, мы возьмем слагающие обеих сил  $\vec{f}_{12}$  и  $\vec{f}_{21}$ , параллельные прямой  $\vec{r}_{12}$ , то они оказываются равными и противоположными друг другу и могут быть выражены простой формулой

$$f' = -\frac{e_1 v_1 e_2 v_2}{c^2 r^2} \cos \theta_{12}, \quad (3)$$

которая обращается в (2) при  $v_1 = v_2$  и  $\theta_{12} = 0$ .

Эта формула характеризует главную часть электрокинетического взаимодействия, т.е. часть, сводящуюся к взаимному притяжению или отталкиванию. Заметим, что эта часть равна электростатическому взаимодействию,

умноженному на  $-\frac{v_1 v_2}{c^2} \cos \theta_{12}$ . В случае, если скорости  $v_1$  и  $v_2$  образуют между собою острый угол, этот множитель отрицателен (силы того и другого рода имеют противоположное направление); при тупом угле  $\theta_{12}$  оба взаимодействия направлены одинаковым образом. В обоих случаях электрокинетическое притяжение или отталкивание остается меньше электростатического.

Подобно тому, как электростатическому взаимодействию двух заряженных частиц  $f = \frac{e_1 e_2}{r^2}$  соответствует по-

тенциальная энергия  $U = -\frac{e_1 e_2}{r}$ , точно так же продольной (параллельной  $r$ ) части электрокинетического взаимодействия соответствует потенциальная энергия

$$U' = -\frac{e_1 e_2}{r^2} \cdot \frac{v_1 v_2}{c^2} \cos \theta_{12}. \quad (4)$$

Что касается поперечной части, т.е. тех слагающих сил  $\vec{f}_{12}$  и  $\vec{f}_{21}$ , которые перпендикулярны к расстоянию  $\vec{r}_{12}$ , то, не будучи равными и противоположными, они не могут быть выведены из какой-либо потенциальной функции.

Для более полной и точной характеристики электрокинетических сил вводят вспомогательное понятие магнитного поля или магнитной напряженности ( $\vec{H}$ ), аналогичной электрической напряженности  $\vec{E}$ , которая служит для описания электростатических взаимодействий. При этом сила  $\vec{f}_{12}$ , действующая на заряд 2 со стороны заряда 1, определяется следующим образом.

а) Двигаясь со скоростью  $v_2$  в магнитном поле  $\vec{H}_{12}$ , создаваемом зарядом  $e_1$ , заряд  $e_2$  испытывает силу, перпендикулярную к векторам  $\vec{v}_2$  и  $\vec{H}_{12}$  и равную

$$f_{12} = \frac{e_2 v_2}{c} H_{12} \sin \varphi, \quad (5)$$

где  $\varphi$  — угол между  $\vec{v}_2$  и  $\vec{H}_{12}$ . По численно-

<sup>1)</sup> Или напряженности магнитного поля.

му своему значению эта сила равна площади параллелограмма, построенного

на векторах  $\frac{e_2 v_2}{c}$  и  $\vec{H}_{12}$ ; по своему направлению она совпадает с тем из двух направлений, перпендикулярных к плоскости этого параллелограмма, в котором надо смотреть для того, чтобы

поворот от вектора  $\frac{e_2 v_2}{c}$  к вектору  $\vec{H}_{12}$  на угол  $\varphi$  меньший  $180^\circ$  совпадал бы с направлением вращения стрелок часов; другими словами, сила  $\vec{f}_{12}$  направлена в сторону поступательного движения обыкновенного („правого“)

винта, вращаемого от вектора  $\frac{e_2 v_2}{c}$  к вектору  $\vec{H}_{12}$ . Так, напр., если первый из них направлен вверх, а второй — направо, то сила должна быть направлена вперед.

б) Магнитное поле  $\vec{H}_{12}$ , создаваемое зарядом  $e_1$ , движущимся со скоростью  $\vec{v}_1$  на расстоянии  $\vec{r}_{12}$ , перпендикулярно к векторам  $\vec{v}_1$  и  $\vec{r}_{12}$  и равно

$$H_{12} = \frac{e_1 v_1}{c r_{12}^2} \sin \theta, \quad (6)$$

где  $\theta$  — угол между  $\vec{r}_{12}$  и  $e_1 \vec{v}_1$ . Таким образом, магнитное поле обратно пропорционально квадрату расстояния. Что же касается его направления, то оно совпадает с направлением движения (правого) винта, вращаемого (на

угол  $\theta < 180^\circ$ ) от вектора  $\frac{e_1 v_1}{c}$  к вектору  $\vec{r}_{12}$ . Так, например, если первый из них направлен вперед, а второй — направо, то поле  $\vec{H}_{12}$  должно быть направлено вниз.

Для наглядного изображения магнитного поля пользуются так назыв. магнитными силовыми линиями, которые проводятся согласно тем же принципам, как и в случае поля электрического, т. е. так, чтобы направления линии в каждой точке совпадало с направлением поля в этой точке, а густота линий была пропорциональна напряженности поля (см. XXVII, 582/84'). При этих условиях магнит-

ное поле движущегося точечного заряда может быть представлено в виде системы коаксиальных кругов, т. е. кругов с общей осью; последняя проходит через заряд в направлении вектора  $e \vec{v}$  и содержит центры кругов, образуемых магнитными силовыми линиями. Направление последних связано с направлением оси по правилу винта: если, следовательно, смотреть на силовые линии в направлении оси, то направление обхода вдоль любой из них совпадает с направлением движения стрелки часов. Так, напр., в случае положительного заряда, движущегося вертикально вниз, магнитные силовые линии образуют горизонтальные круги, направление которых для наблюдателя, смотрящего на них сверху, совпадает с направлением движения часовой стрелки. — Что касается густоты силовых линий, то, согласно предыдущему, она должна быть обратно пропорциональна квадрату расстояния от заряда, а при данном расстоянии уменьшаться по мере приближения к направлению оси, обращаясь в нуль вблизи последней.

Закон (5), определяющий действие магнитного поля на движущийся заряд, называется законом *Ампера*, а закон (6), определяющий магнитное поле, создаваемое движущимся зарядом, называется законом *Био-Савара*, по имени установивших эти законы французских ученых.

Как видно из предыдущего, понятие магнитного поля, не будучи существенно необходимым для описания электрокинетического взаимодействия, оказывается все же весьма удобным в смысле более простого и точного описания этого взаимодействия. Единица напряженности магнитного поля носит название „гаусса“ (в честь немецкого математика Гаусса, впервые разработавшего теорию земного магнетизма, см. ниже). Заметим далее, что при изучении электрокинетического взаимодействия на электризованных частиц вместо обычной электростатической единицы электрического заряда вводится в  $c = 3 \cdot 10^{10}$  раза большая единица, называемая *элек-*

тромагнитной. При этом условии выражение  $\frac{e v}{c}$ , играющее в случае

электрокинетического взаимодействия роль, аналогичную той, которую заряд  $e$  играет в случае взаимодействия электростатического, может быть определено как электрическое количество движения, выраженное в электромагнитных единицах (ибо отношение  $\frac{e}{c}$  представляет собой в электромагнитных единицах заряд, равный  $e$  электростатическим единицам).

§ 2. *Взаимодействие электрических токов.* Электрокинетическое взаимодействие заряженных частиц обнаруживается на опыте простейшим и наиболее непосредственным образом в виде так называемых „пондермоторных“ сил, действующих между замкнутыми металлическими проводниками, по которым текут постоянные электрические токи. В этом случае, поскольку различные элементы рассматриваемых проводников нейтральны, электростатическое взаимодействие между ними исчезает. Что же касается электрокинетического взаимодействия, то в этом отношении элемент объема какого-либо проводника  $dV$ , при наличии в нем электрического тока с плотностью  $\vec{j}$ , ведет себя как заряд с электрическим количеством движения  $\vec{j} dV$ . В случае точного „линейного“ проводника под  $dV$  обычно подразумевается элемент объема, соответствующий весьма малому элементу длины  $ds$ . Обозначая поперечное сечение подобного проводника через  $q$ , мы имеем  $dV = q ds$  и, следовательно,  $\vec{j} dV = \vec{j} q ds = i ds$ , где  $i$  представляет собой силу тока в обычном определении, т.е. количество электричества, проходящего в единицу времени через данное или—ввиду стационарности тока—через любое сечение рассматриваемого проводника. Таким образом, отрезок  $ds$  линейного проводника (провода), в котором течет ток силы  $i$ , в смысле производимых и испытываемых им электрокинетических действий эквивалентен точечному заряду с элек-

трическим количеством движения  $i ds$ . Это выражение называется обычно *элементом тока*. Если, следовательно, измерять силу тока не в электростатических единицах, как это делалось во II главе, а в электромагнитных единицах, то в применении к элементу тока законы Ампера и Био-Савара могут быть выражены формулами

$$f = H i \cos \varphi ds \quad (7)$$

и

$$dH = \frac{i ds}{r^2} \sin \theta, \quad (8)$$

при чем направление электрического количества движения определяется в обоих случаях тем направлением отрезка  $ds$ , в котором происходит перенос положительного электричества. Поскольку в металлических проводах перенос электричества осуществляется отрицательными электронами, это направление фактически противоположно направлению движения последних.

Из формулы (8) следует, что в центре кругового тока, т.е. тока, текущего по окружности радиуса  $r$ , магнитная напряженность равна (в виду  $s = 2\pi r$  и  $\theta = 90^\circ$ ):

$$H = \frac{2\pi i}{r},$$

при чем вектор  $\vec{H}$  направлен в сторону движения (правого) винта, вращаемого в направлении тока.

Несколько более сложное вычисление показывает, что в случае прямолинейного провода очень большой (практически бесконечной) длины, магнитная напряженность обратно пропорциональна расстоянию от провода  $R$  и равна

$$H = \frac{2i}{R}.$$

При этом магнитные силовые линии образуют круги, охватывающие провод, который служит их общей осью. В непосредственной близости к линейному проводнику любой формы магнитное поле имеет то же самое строение, как и в случае бесконечного прямолинейного проводника. Вообще же говоря, магнитные силовые линии имеют при этом форму *замкнутых*

колец, охватывающих контур тока (проводник), как показано на рис. 14.

На очень больших расстояниях от (замкнутого) проводника с током, т.е. таких расстояниях  $r$ , которые очень велики в сравнении с линейными размерами проводника, магнитное поле имеет строение, тождественное со строением электрического поля, создаваемого двумя зарядами равной величины и противоположного знака, расположенными надлежащим образом в той же области, где находится проводник. Совокупность двух подобных зарядов называется *электрическим диполем*. Выше (гл. I) мы уже

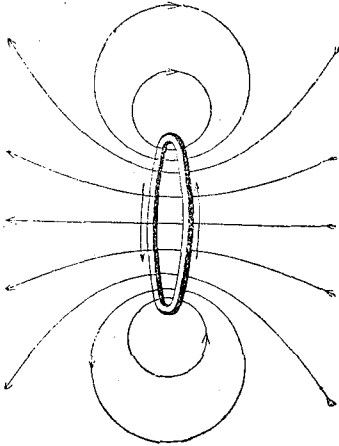


Рис. 14.

определили *момент* диполя как вектор, равный произведению отрезка, проведенного от отрицательного заряда к положительному ( $d$ ), на их численное значение ( $e$ ). На больших расстояниях от электрического диполя поле его всецело определяется вектором момента  $\vec{p} = e\vec{d}$ . Соответственно этому для характеристики магнитного поля на большом расстоянии от замкнутого тока часто пользуются представлением о *магнитном диполе*, образованном двумя „магнитными зарядами“ или „полюсами“ противоположного знака и создающими в отдельности магнитное поле, тождественное с электрическим полем точечного электрического заряда. В действительности подобных полюсов

не существует, так что они должны рассматриваться лишь как удобные фикции. Обозначая численное значение полюсов магнитного диполя через  $m$ , а вектор, проведенный от отрицательного полюса к положительному, через  $\vec{d}$ , мы можем определить произведение  $\vec{\mu} = m\vec{d}$  как момент магнитного диполя. Несмотря на фиктивность обоих его множителей, этот вектор имеет вполне реальное значение, так как он определяет магнитное поле замкнутого тока (на больших расстояниях) совершенно таким же образом, каким вектор электрического момента определяет поле электрического диполя (также, конечно, лишь на больших расстояниях).

Магнитный момент замкнутого электрического тока может быть представлен в виде произведения двух множителей, имеющих вполне реальное значение. Одним из этих множителей является *сила* тока  $i$ , а другим — некоторый вектор, зависящий от формы и размеров контура (проводника), а также от направления, в котором он обтекается током. В простейшем случае *плоского* контура этот вектор численно равен его площади  $S$ , при чем направление его связано с направлением тока по правилу (правого) винта. Таким образом, численное значение магнитного момента электрического тока выражается в этом случае формулой

$$\vec{\mu} = iS. \quad (9)$$

В случае электрического диполя вектор момента определяет не только производимое им действие (т.е. поле), но и действие, испытываемое им в данном внешнем поле. Действие это сводится, во-первых, к вращательному усилению, стремящемуся ориентировать момент диполя в направлении силовых линий, и, во-вторых, к некоторой силе, стремящейся двигать его в сторону увеличения или уменьшения густоты силовых линий, т.е. напряженности поля, — в зависимости от того, образует ли направление последнего острый или тупой угол с направлением момента. При перпендикулярности последнего к полю, движущая сила обращается в нуль, тогда как вращательное усилие достигает максимума, а при параллель-

ности, наоборот, исчезает вращательное усилие, и достигает максимального значения движущая сила. Эти результаты могут быть легко выведены из рассмотрения *потенциальной энергии* диполя. Обозначая потенциал внешнего электрического поля на отрицательном и на положительном конце диполя соответственно через  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , мы можем представить эту потенциальную энергию в виде  $U = e(\varphi_2 - \varphi_1) = ed \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{d} = -pE \cos \alpha$ , где  $p = ed$  — момент диполя, а  $E \cos \alpha = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}$  — проекция электрической напряженности в направлении его оси. Мы получаем, таким образом,  $U = -pE \cos \alpha$ . В случае магнитного диполя потенциальная энергия выражается аналогичной формулой

$$U = -\mu H \cos \alpha, \quad (10)$$

где  $\alpha$  обозначает угол между векторами  $\vec{\mu}$  и  $\vec{H}$ .

Это выражение можно вывести непосредственно, исходя из формулы (7), определяющей силу, испытываемую элементами тока в данном внешнем магнитном поле, — в предположении, что в области, занимаемой контуром тока, это поле остается (приблизительно) однородным, т.е. неизменным по величине и направлению; другими словами, предполагается, что линейные размеры тока малы в сравнении с теми расстояниями, на которых происходит изменение поля  $\vec{H}$ . Таким образом, эквивалентность подобного „элементарного линейного тока“ магнитному диполю имеет место не только по отношению к действию, производимому им, но и к действию, им испытываемому.

Само собой разумеется, что эта эквивалентность имеет место лишь при условии „элементарности“ тока, т.е. при малости его геометрических размеров в сравнении с расстояниями, для которых определяется создаваемое им поле или на которых заметно изменяется поле, на него действующее. В непосредственной близости к замкнутому току и эквивалентному ему диполю, поля, создаваемые ими, имеют совершенно различное строение. Для

того, чтобы обеспечить эквивалентность их в наиболее полной степени, вместо диполя, образованного двумя *точечными* магнитными полюсами, вводят так называемый *двойной магнитный слой* или *листок*. Подобный слой представляет собой бесконечно тонкую лепешку, ограниченную контуром тока, но помимо этого обстоятельства могут иметь произвольную форму. Одна сторона этой лепешки покрыта отрицательным, а другая положительным магнетизмом таким образом, чтобы произведение поверхностной плотности „магнитного заряда“ на толщину слоя равнялось силе тока (что соответствует совпадению магнитного момента слоя и тока). При таких условиях магнитное поле *вне* слоя в точности совпадает с магнитным полем окаймляющего его тока — вплоть до сколь угодно малых расстояний от отрицательной или положительной поверхности слоя. Магнитные силовые линии, начинаясь на положительной стороне, охватывают контур тока и заканчиваются на отрицательной стороне. Считая их бесконечно близкими и сцепляя оба конца каждой из силовых линий, мы получим *в точности* картину поля, создаваемого током. Внутри же слоя, т.е. в бесконечно тонком промежутке между его поверхностями, магнитное поле меняет свое направление на противоположное и приобретает бесконечно большую напряженность — что, конечно, никакого отношения к действительности не имеет. Исключая, однако, эту область, мы можем считать данный ток совершенно эквивалентным соответствующему двойному магнитному слою как в смысле действий, им производимых, так и в смысле действий, им испытываемых.

Вопрос о взаимодействии двух замкнутых линейных токов может быть решен непосредственно, т.е. без введения понятия магнитного поля, при помощи выражения (4) для взаимной потенциальной энергии, соответствующей продольной части электрокинетического взаимодействия (т.е. взаимному притяжению или отталкиванию) двух движущихся зарядов. Заменяя соответствующие последним электрические количества движения элементами то-

ков  $i_1 ds_1$  и  $i_2 ds_2$ , мы получаем

$$dU' = - \frac{i_1 i_2}{r_{12}} \cos \theta_{12} ds_1 ds_2. \quad (11)$$

Легко показать, что сумма этих выражений для различных элементов обоих токов представляет собой взаимную потенциальную энергию последних, совпадая с взаимной потенциальной энергией эквивалентных им магнитных листков. Таким образом, поперечные слагающие электрокинетического взаимодействия, не учитываемые выражением (11), выпадают из рассмотрения при суммировании этих взаимодействий для всех элементов замкнутого тока.

Взаимная потенциальная энергия двух замкнутых токов может быть представлена согласно формуле (11) в виде

$$U'_{12} = - L_{12} i_1 i_2, \quad (12)$$

где  $L_{12}$  — некоторый коэффициент, имеющий размерность длины и зависящий от формы и расположения соответствующих проводников. Этот коэффициент называется *коэффициентом взаимной индукции*<sup>1)</sup> обоих токов (см. ниже). Аналогичным образом, исходя из той же формулы (4), можно определить потенциальную энергию какого-либо замкнутого тока на самого себя. Эта собственная потенциальная энергия тока выражается формулой

$$U = - \frac{1}{2} L i^2, \quad (13)$$

где  $L$  называется *коэффициентом самоиндукции*<sup>2)</sup> данного тока или, вернее, проводника. Эта формула может быть получена из предыдущей, если представить себе рассматриваемый ток расщепленным на множество параллельных бесконечно тонких токовых нитей и если энергию его определить как взаимную потенциальную энергию всех этих нитей друг на друга. Собственная потенциальная энергия тока может, разумеется, проявиться только в том случае, если контур его не твердый (как это предполагалось до сих пор), но способен деформироваться.

§ 3. *Электромагнитная индукция.* В случае неподвижных проводников

электрокинетическое взаимодействие проявляется в виде пондермоторных сил, т.е. сил, действующих на каждый элемент проводника в поперечном (перпендикулярном к нему) направлении. В том случае, когда рассматриваемый проводник перемещается в данном магнитном поле, создаваемом какими-нибудь другими неподвижными проводниками с постоянными токами, к этим поперечным пондермоторным силам присоединяются *продольные электромоторные силы*, т.е. электрические силы, действующие в продольном направлении и притом в противоположных направлениях на противоположные заряды, содержащиеся в каждом элементе проводника. Происхождение этих продольных сил то же самое, что и поперечных сил: первые определяются поперечной слагающей скорости зарядов, движущихся вместе с проводником, совершенно таким же образом, как вторые обуславливаются продольной слагающей скорости этих зарядов по отношению к проводнику. Однако, внешний эффект тех и других совершенно различен: действуя в поперечном направлении, „пондермоторные“ силы стремятся вызвать перемещение проводника как целого, в то время как продольные силы, не действуя на проводник как целое, стремятся вызвать перемещение противоположных зарядов в противоположные стороны, т.е. изменить силу тока, образуемого продольным движением этих зарядов.

Представим себе, напр., вертикальный проводник длины  $l$ , движущийся слева направо со скоростью  $v$  в однородном магнитном поле  $H$ , направленном к наблюдателю. При отсутствии в проводнике электрического тока мы можем считать, что каждый из находящихся в нем зарядов  $e$  движется направо с той же скоростью  $v$  и испытывает силу, перпендикулярную к направлению движения и поля, т.е. параллельную длине проводника, и равную согласно формуле (5)  $\frac{ev}{c} H$ . В случае  $e > 0$  эта сила должна быть направлена вверх, а в случае  $e < 0$  вниз.

Таким образом, действие магнитного поля на движущийся в нем проводник

<sup>1)</sup> Или взаимной индуктивностью.

<sup>2)</sup> Или собственной индуктивностью.

оказывается в рассматриваемом случае эквивалентным действию продольного (вертикального) электрического поля с напряженностью

$$E = \frac{v}{c} H.$$

Если скорость  $v$  образует с полем  $H$  угол  $\varphi$  (оставаясь в горизонтальной плоскости), то эквивалентное электрическое поле оказывается равным

$$E = \frac{v}{c} H \sin \varphi. \quad (14)$$

Представим себе прямоугольную рамку с двумя вертикальными сторонами с высотой  $l$  и двумя горизонтальными с длиной  $2a$ . Если вращать подобную рамку вокруг вертикальной оси, проходящей через середины го-

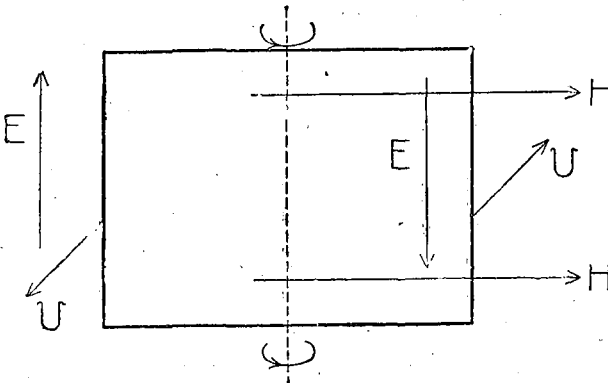


Рис. 15.

ризонгальных сторон, то в каждый момент времени противоположные вертикальные стороны будут иметь противоположно направленные скорости, чему соответствует противоположное направление эквивалентных электрических полей (рис. 15). В виду замкнутости контура, образуемого рамкой, действие этих полей будет складываться, вызывая электрический ток определенного направления, зависящего от угла, образуемого нормально к рамке, с направлением магнитного поля и от направления вращения.

Описанное нами явление возникновения электродвижущей силы в замкнутом проводнике при движении его в магнитном поле называется *электромагнитной индукцией* (точнее—оно представляет собой частный случай

электромагнитной индукции, см. ниже). Что касается величины индукционной электродвижущей силы, то она может быть определена на основании того же принципа, который служит для определения э.д. сил гальванического происхождения, а именно—величиной той разности потенциалов (или суммы подобных разностей), которая необходима для ее компенсации. Если в контуре с длиной  $l$  действует э.д. сила, эквивалентная электрическому полю  $E$ , то величина этой э.д. силы равна  $El$ . В только что рассмотренном случае вращающейся рамки мы получаем, таким образом, э.д. силу  $V = 2El$ . Сила вызываемого ею тока может быть

определена по формуле  $i = \frac{V}{R}$ , где  $R$ —общее сопротивление проводника, образующего рамку (с поправкой на самоиндукцию; см. ниже).

Обозначая угловую скорость вращения рамки через  $\omega$ , мы имеем  $v = \omega a$  и, следовательно,

$$\begin{aligned} V &= 2El = 2lH \frac{v}{c} \sin \varphi = \\ &= 2laH \frac{\omega}{c} \sin \varphi = \\ &= \frac{1}{c} SH \omega \sin \varphi, \end{aligned}$$

где  $S = 2al$ —площадь рамки. Так как скорость  $\omega$  равна быстроте изменения угла  $\varphi$ , т.е. производной его по времени  $\frac{d\varphi}{dt}$ , то, принимая во внимание,

что  $\sin \varphi \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{d}{dt} (\cos \varphi)$ , мы получаем следующее равенство:

$$\begin{aligned} V &= -\frac{1}{c} \frac{d}{dt} (SE \cos \varphi) = \\ &= -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}, \end{aligned} \quad (15)$$

где величина  $\Phi = SH \cos \varphi$  представляет собой так называемый *магнитный поток* через контур рамки. Изображая магнитное поле при помощи силовых линий, проводимых с таким расчетом, чтобы число их на единицу площади численно равнялось напряженности поля  $H$ , мы можем опреде-

лить магнитный поток как число магнитных силовых линий, пронизывающих рассматриваемый контур в данном направлении (изменению последнего на противоположное соответствует изменение знака магнитного потока).

Формула (15) может быть установлена в общем случае произвольного движения какого-либо линейного проводника в постоянном магнитном поле более простым, хотя и несколько косвенным образом, основывающимся на том обстоятельстве, что электрокинетическая сила, действующая на движущийся заряд, вследствие своей перпендикулярности к направлению движения не может производить работы. Отсюда следует, что работа электромоторных сил, появляющихся в движущемся проводнике с некоторым током  $i$ , должна быть равна по величине и противоположна по знаку работе пондеромоторных сил, действующих на него за то же самое время. Но работа электромоторных сил может быть выражена произведением индукционной электродвижущей силы  $V$  на силу тока  $ic$  (в электростатических единицах) и на время  $dt$ . Работа же пондеромоторных сил может быть представлена убылью потенциальной энергии этого проводника  $U'$  по отношению к источнику магнитного поля (который мы можем представлять себе в виде какого-либо другого неподвижного проводника) за то же время, при неизменной силе тока  $i$ . Мы получаем, таким образом, равенство  $Vicdt = +dU' = -\frac{dU'}{dt} dt$ ,

$$\text{или } Vic = \frac{dU'}{dt}.$$

С другой стороны, как мы видели выше, потенциальная энергия  $U'$  в случае элементарного тока (т.е. проводника малых размеров) выражается формулой (10). Подставляя в нее значение магнитного момента тока  $\mu = iS$ , мы получаем  $U' = -iSH \cos \varphi$ , или

$$U' = -i\Phi. \quad (16)$$

Эта формула может быть легко обобщена на случай линейного замкнутого тока произвольных размеров и формы. Считая силу тока постоянной, мы получаем, следовательно,

$$V = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}. \quad (17)$$

В рассмотренной нами форме явление электромагнитной индукции представляет собой основной источник электрического тока в технике. Машин, служащие для его получения этим путем, называются *динамомашинами*. Обычно динамомашинны (подобно электростатическим машинам) основываются на комбинации принципа э.-м. индукции с принципом *самовозбуждения*. Последний заключается в том, что ток, индуктированный во вращающемся проводнике (якоре), пропускается (последовательно или параллельно) через неподвижный проводник (обмотку возбуждения), создавая или усиливая, таким образом, индуктирующее магнитное поле. То первичное магнитное поле, которое необходимо в самом начале процесса самовозбуждения динамомашинны, обычно обеспечивается слабым остаточным намагничиванием железных сердечников арматуры (см. ниже).

На первый взгляд может показаться, что путем самовозбуждения могут быть достигнуты сколь угодно интенсивные магнитные поля и сколь угодно большие силы тока. В действительности, однако, значения того и другого ограничены той механической мощностью, которая применяется для вращения якора. Последний испытывает при наличии в нем тока поперечные пондеромоторные силы, о которых мы говорили выше и которые противодействуют вращательному движению, вызывающему индукционный ток.

Пропуская через динамомашинну электрический ток, создаваемый каким-нибудь посторонним источником, можно привести во вращение ее якоря, т.е. заставить ее действовать как электромотор. При этом „обращенном“ действии динамомашинны в ней индуктируется, однако, обратная электродвижущая сила, т.е. э.-д. сила, противоположная той, которой вызывается ток, чем ограничивается скорость вращения якора (см. *электротехника—электрические машины*).

Таким образом, в обоих случаях взаимодействующие факторы находятся в антагонистическом отношении друг к другу, т.е., если фактор  $A$  (напр., вращение якора) вызывает  $B$



(ток), то фактор  $B$  стремится уменьшить  $A$ . Этот принцип—применимый, впрочем, не только к электромагнитным явлениям, но и к множеству других явлений физики — называется обычно законом *Ленца*.

Чрезвычайно общая форма, в которой выражается закон электромагнитной индукции, делает весьма естественным обобщение его на тот случай, когда изменение магнитного потока  $\Phi$ , определяющее согласно формуле (17) индукционную э.-д. силу, вызывается не движением данного проводника, а изменением магнитного поля, в котором находится неподвижный проводник, или же комбинацией того и другого фактора. Представим себе, напр., два замкнутых линейных проводника с токами  $A_1$  и  $A_2$ . Опыт показывает, что, если они движутся совместно, т.-е. таким образом, что их относительное положение остается неизменным, то ни в том, ни в другом проводнике никаких индукционных явлений не наблюдается. Отсюда следует, что изменение магнитного потока  $\Phi_{12}$ , исходящего от  $A_1$  и проходящего через  $A_2$ , вызывает в  $A_2$  один и тот же индукционный эффект независимо от того, обуславливается ли это изменение движением  $A_2$  или движением  $A_1$ . Далее, однако, представляется естественным предположить, что индукционный эффект в неподвижном проводнике  $A_2$ , вызываемый изменением магнитного потока  $\Phi_{12}$ , не зависит от специальных условий, которыми определяется это изменение, — напр., от движения ли проводника  $A_1$ , или от изменения силы тока в нем. Мы приходим, таким образом, к явлению индукции совершенно иного типа, нежели то, из которого мы исходили, а именно — к возбуждению электродвижущей силы в неподвижном проводнике вследствие изменения силы тока в другом также неподвижном проводнике. Механизм э.-м. индукции этого типа совершенно иной, нежели у индукции первого типа, обусловленной движением рассматриваемого проводника в постоянном магнитном поле. Там дело сводилось к обычному электрокинетическому взаимодействию, т.-е. к созданию одним движущимся зарядом магнитного поля, действующего на дру-

гой так же движущийся заряд. Здесь, т.-е. в случае индукции нового типа, мы имеем дело с силой, действующей на *неподвижные заряды*, т.-е. с силой, обусловленной присутствием не магнитного, а *электрического* поля, создаваемого зарядами, образующими *переменный* электрический ток. Так как сила тока пропорциональна скорости зарядов, то быстрота изменения силы тока  $\frac{di}{dt}$ , которой определяется рассматриваемый эффект, должна быть прямо пропорциональна *ускорению* этих зарядов. Таким образом, оказывается, что ускоренное движение электрических зарядов возбуждает электрическое поле, пропорциональное ускорению. Этим не кулоновым, а так сказать „*фарадеевым*“ электрическим полем (явления индукции были впервые открыты и изучены Фарадеем) и обуславливается рассматриваемый индукционный эффект. Можно показать, что к тому же самому механизму, т.-е. фарадееву электрическому полю, сводится индукционный эффект, обусловленный движением индуктирующего проводника при неизменности силы тока.

Строение фарадеевского поля будет подробно изучено нами в следующей главе. Здесь же мы ограничимся несколькими соображениями, вытекающими из предыдущего и относящимися к вопросу об *энергии* электрических токов.

Мы видели выше, что работа поперечных пондеромоторных сил, действующих между двумя проводниками  $A_1$  и  $A_2$ , может быть выведена из некоторой потенциальной энергии их:  $U_{12} = -L_{12} i_1 i_2$ . Так как сумма этой работы и работы продольных электромоторных сил, индуктируемых в каждом из проводников благодаря его движению в поле другого, равна нулю, то отсюда следует, что последняя работа может быть определена как уменьшение некоторой энергии  $T_{12} = -U_{12} = L_{12} i_1 i_2$ . Но движение каждого проводника, наряду с индукционной электродвижущей силой магнитного происхождения в нем самом, вызывает индукционную электродвижущую силу той же самой величины, но уже не магнитного (элект-

рокинетического), а электрического (фарадического) происхождения в другом проводнике. Таким образом, полная энергия обоих проводников, т.е. та величина, уменьшением которой определяется работа всех сил, действующих на находящиеся в них заряды, равна сумме  $2T_{12} + U_{12} = T_{12}$ . В виду компенсации работы поперечных и продольных сил магнитного происхождения, можно считать, что энергия

$$T_{12} = L_{12} i_1 i_2 \quad (18)$$

целиком определяет работу одних лишь фарадических сил, т.е. индукционных э.д. сил электрического происхождения. Ее можно определить как работу, которую нужно затратить против этих сил, чтобы при данном положении обоих проводников, определяемом коэффициентом взаимной индукции  $L_{12}$ , создать в них токи  $i_1$  и  $i_2$ . Аналогичным образом в случае отдельного проводника энергия

$$T_{11} = \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 \quad (19)$$

представляет собой меру работы, которую нужно затратить для создания в нем тока  $i_1$  или, вернее, для преодоления той *электродвижущей силы самоиндукции*, которая вызывается в нем изменением силы тока от нуля до данного значения. Эту э.д. силу самоиндукции можно рассматривать как результирующую э.д. сил взаимной индукции между бесконечно тонкими струями, на которые можно (мысленно) расчленить ток в данном проводнике. Обозначая ее через  $V_{11}$  и замечая, что работа ее за единицу времени равна  $V_{11} i_1$ , имеем

$$V_{11} i_1 c = - \frac{dT_{11}}{dt} = - L_{11} i_1 \frac{di_1}{dt}$$

т.е., следовательно,

$$V_{11} = - \frac{1}{c} L_{11} \frac{di_1}{dt} \quad (20)$$

Аналогичной формулой, а именно

$$V_{12} = - \frac{1}{c} L_{12} \frac{di_1}{dt} \quad (21)$$

определяется э.д. сила, индуктируемая в проводнике  $A_2$  вследствие изменения силы тока в (неподвижном) проводнике  $A_1$ . Здесь  $L_{12} i_1$  представляет собой не что иное, как магнитный поток  $\Phi_{12}$ . По аналогии величину  $L_{11} i_1 = \Phi_{11}$  можно

определить как магнитный поток, исходящий от данного тока и проходящий через его собственный контур. Это определение лишено, однако, ясного физического смысла, поскольку при рассмотрении собственной энергии тока проводник, по которому он течет, нельзя рассматривать как бесконечно тонкую линию.

Энергия  $T_{11} = T$  может быть выражена как сумма бесконечно малых элементов

$$\text{вида } + \frac{e_1 v_1 \cdot e_2 v_2}{c^2 r_{12}} \cos \theta_{12}, \text{ составлен-}$$

ных для всех зарядов, образующих данный ток [см. формулу (4)]<sup>1)</sup>. Разделяя проводники на бесконечно малые элементы объема  $dV$  и замечая, что электрическое количество движения, связанное с каждым из этих элементов, равно произведению его на плотность тока, мы получаем для энергии  $T$  сумму выражений вида

$$\frac{j' j'' \cos \theta}{r} dV' dV'' \quad (22)$$

для всевозможных элементов объема, взятых попарно ( $\theta$  представляет собой угол между направлениями векторов, плотности тока  $\vec{j}'$  и  $\vec{j}''$  в элементах  $dV'$  и  $dV''$ ).

Подобно тому как соответствующее выражение для электростатической энергии некоторого объемного распределения электрических зарядов, предыдущее выражение может быть преобразовано в сумму выражений вида

$$\frac{H^2}{8\pi} dV, \quad (23)$$

взятых для всего пространства, где магнитное поле отлично от нуля. Таким образом энергию  $T$ , которая, как мы видели выше, измеряет работу индукционных электрических сил, возбуждаемых изменением магнитного поля, можно трактовать как энергию, связанную с этим полем и распределенную в пустом пространстве с объемной плотностью  $\frac{H^2}{8\pi}$ . Это определение маг-

нитной энергии вполне соответствует определению электрической энергии, как величины, связанной с электри-

<sup>1)</sup> При этом каждая пара зарядов должна входить в сумму всего лишь, один раз.

ческим полем и распределенной в пространстве с объемной плотностью  $\frac{E^2}{8\pi}$ . Далее, легко показать, что ponderomotorные силы, действующие между проводниками с током, могут быть сведены, подобно электростатическим силам между наэлектризованными телами, к натяжению  $\frac{H^2}{8\pi}$  вдоль магнитных силовых линий и давлению  $\frac{H^2}{8\pi}$  в поперечном направлении.

Предыдущие результаты легко обобщаются на случай любой системы токов, при чем под  $T$  в этом случае следует понимать полную величину их магнитной энергии, т. е., напр., в случае двух токов величину

$$T = T_{11} + T_{12} + T_{22} = \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 + L_{12} i_1 i_2 + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2. \quad (24)$$

Заметим, что магнитная энергия, так, как мы ее определили в этом параграфе, представляет собой большое сходство с кинетической энергией системы материальных частиц. Это сходство выступает особенно отчетливо в случае отдельного проводника (соответствующем случаю отдельной частицы). Здесь сила тока играет роль скорости  $v$ , а коэффициент самоиндукции — роль массы  $m$  в обычном выражении для кинетической энергии  $\frac{1}{2} mv^2$ . То, что сходство это имеет не поверхностный характер, а лежит в существе дела, вытекает из того обстоятельства, что сила тока на самом деле пропорциональна скорости движения зарядов в проводнике. Далее, электродвижущая сила самоиндукции  $-L \frac{di}{dt}$  представляет собой полный аналог силы инерции  $-m \frac{dv}{dt}$ ; ее можно трактовать как силу инерции электрического тока.

Аналогия между магнитной и кинетической энергией не выдерживается полностью в случае системы токов или системы частиц. Здесь на ряду с суммой членов, соответствующих отдельным токам (или частицам), мы имеем члены, характеризующие взаимодей-

ствие разных токов. Им должны были бы соответствовать члены, пропорциональные произведению скоростей различных частиц, т. е. члены вида  $m_{12} v_1 v_2$ , которые можно было бы определить как взаимную кинетическую энергию этих частиц, при чем коэффициенты  $m_{12}$ , аналогичные коэффициентам взаимной индукции, можно было бы трактовать как „взаимную массу“. Точно так же сила инерции, испытываемая какой-нибудь частицей, должна была бы слагаться из обычной силы инерции или „самоинерции“  $-m_{11} \frac{dv_1}{dt}$  ( $m_{11} = m_1$ ) и сил взаимной инерции  $-m_{12} \frac{dv_2}{dt}$  и т. д., определяемых ускорениями остальных частиц.

Развитие электрической теории материи привело к преобразованию старых представлений о кинетической энергии и инерции в духе только что изложенных представлений. А именно, поскольку элементарные частицы материи обладают электрическими зарядами, движение их должно сопровождаться такими же электромагнитными эффектами, как и движение зарядов в проводниках. В частности, напр., при ускоренном движении электрона (или протона) элементы его заряда должны оказывать друг на друга индукционное действие, обусловленное их фарадеевским полем и сводящееся к силе, пропорциональной ускорению и обратной ему по направлению. Эта сила самоиндукции электрона ничем, следовательно, не отличима от обыкновенной силы инерции. Представляется, поэтому, вполне естественным отождествить последнюю с первой, т. е., другими словами, рассматривать силу инерции электрона (или протона) как электродвижущую силу самоиндукции связанного с ним заряда. С этой точки зрения масса электрона оказывается электромагнитной величиной, обусловленной его зарядом, или, вернее, фарадеевским взаимодействием элементов этого заряда, при чем сам электрон (или протон) оказывается не чем иным, как электрическим зарядом, сосредоточенным в некотором элементе объема. Последний должен иметь конечную величину, так как в противном случае

масса электрона оказалась бы бесконечной. Обычно электроны и протоны представляются в виде шариков, заряд которых равномерно распределен по их объему или поверхности. Радиус этих шариков должен быть тем меньше, чем больше их масса. Вычисление последней проще всего можно произвести, исходя не из силы инерции (самоиндукции), которая появляется при ускоренном движении, а из кинетической, т.е. магнитной энергии, которая определяется скоростью. Пользуясь формулой (6), нетрудно показать, что заряд  $e$ , распределенный внутри или на поверхности шара, создает вне шара такое же магнитное поле, как если бы он был сосредоточен в центре, т.е. поле

$$H = \frac{ev}{cr^2} \sin \theta = E \frac{v}{c} \sin \theta, \quad (24)$$

где  $E$ —кулоновское электрическое поле, создаваемое им в той же самой точке. Это соотношение между электрическим и магнитным полем равномерно движущегося заряда остается в силе и для внутренних точек. Отсюда следует, что магнитная энергия, т.е.

интеграл  $\int \frac{H^2}{8\pi} dv$ , взятый по всему пространству, равен электрической энергии кулонова поля  $\int \frac{E^2}{8\pi} dv$ , умноженной на среднее значение множителя  $\frac{v^2}{c^2} \sin^2 \theta$  для различных значений угла  $\theta$  между вектором скорости  $\vec{v}$  и радиусом-вектором соответствующей точки пространства относительно центра заряда. В случае шаровой симметрии среднее значение  $\sin^2 \theta$  сводится к  $\frac{2}{3}$ , и мы получаем таким образом следующее соотношение между магнитной энергией  $T$  и электрической  $U$ :

$$T = \frac{2}{3} \frac{v^2}{c^2} U. \quad (25)$$

В случае шарика радиуса  $a$  с поверхностным зарядом  $e$ , энергия  $U$  равна  $\frac{e^2}{2a}$ . Таким образом предыдущее выражение для магнитной энергии может быть переписано в виде

$$T = \frac{1}{2} mv^2,$$

при чем масса  $m$  оказывается равной

$$m = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^2 a}. \quad (26)$$

Подставляя сюда значения  $e = \pm 4,77 \cdot 10^{-10}$  и  $c = 3 \cdot 10^{10}$ , мы получаем в случае электрона ( $m = 9 \cdot 10^{-28}$ )  $a = 2 \cdot 10^{-13}$  см, а в случае протона, имеющего примерно в 2.000 раз большую массу, соответственно, т.е. в 2.000 раз, меньший радиус.

Согласно обычным представлениям о массе, последняя является свойством *аддитивным*, т.е. масса системы, образованной несколькими частицами, равняется сумме масс этих частиц, взятых в отдельности. С точки зрения вышеизложенной электромагнитной теории массы, подобная аддитивность не имеет места. В случае системы, образованной совокупностью нескольких электронов или протонов, напр. атома или атомного ядра у сложных атомов, к сумме масс отдельных частиц необходимо прибавить их взаимные массы, характеризующие силы взаимной индукции, которые они оказывают друг на друга при ускоренном движении. Эти взаимные массы тем больше, чем ближе разные частицы друг к другу. При этом в случае одноименных частиц они имеют положительные, а в случае разноименных частиц—отрицательные значения. Если в рассматриваемой системе разноименные частицы ближе друг к другу, чем одноименные (так что притяжение преобладает над отталкиванием и система для своего расчленения требует некоторой энергии), то сумма всех взаимных масс оказывается отрицательной. Мы получаем в этом случае *дефект* массы. Подобный дефект массы имеется у всех материальных тел; однако, заметной величины он достигает лишь у ядер сложных атомов, в виду их чрезвычайно малых размеров, т.е. чрезвычайно тесной упаковки электронов и протонов, их образующих. Дефект этот составляет около 0,8% массы каждого протона, т.е. он в 16 раз больше массы электрона (по отношению к массе всех электронов, имеющих в ядре, он еще больше, так как число этих электронов меньше числа протонов).

Этим объясняется то обстоятельство, что, принимая атомный вес кислорода за 16, или гелия за 4, для водорода получают атомный вес 1,008, между тем как атом кислорода состоит ровно из 16, а атом гелия из 4 атомов водорода.

§ 4. *Магнетизм* (ср. XXV II, 579' след.). Электрокинетические взаимодействия и связанные с ними индукционные явления были впервые обнаружены в замаскированной форме, а именно в форме сил взаимодействия между особыми телами, называемыми *магнитами*. Силы взаимодействия между постоянными магнитами были количественно изучены Кулоном, почти одновременно с силами взаимодействия между наэлектризованными телами. При этом Кулон пришел к выводу, что магнитные силы, подобно электрическим, обуславливаются наличием „магнитных полюсов“, совершенно аналогичных по своим действиям друг на друга электрическим зарядам. В каждом магните, или теле, способном намагничиваться, магнитные полюса противоположного знака находятся в эквивалентных количествах, подобно электрическим зарядам противоположного знака в нейтральном теле. Однако, в отличие от электрических зарядов отделение магнитных полюсов противоположного знака друг от друга оказывается абсолютно невозможным. Таким образом, явления магнетизации, аналогичного электризации в обычном смысле слова, никогда не наблюдается. Магнит, или способное намагничиваться тело, ведет себя совершенно таким же образом, как поляризованный или могущий поляризоваться диэлектрик, при чем явление намагничивания оказывается аналогичным не электризации, а *поляризации* диэлектрика.

В начале XIX века Вебер ввел представление о том, что магнетизм является молекулярным свойством, т.е. что молекулы магнита представляют собой маленькие магнитики, ориентированные одинаковым образом. В теле, способном намагничиваться, они при обычных условиях ориентированы беспорядочно, но под влиянием внешнего магнитного поля приобретают одинаковую ориентировку, которая и проявляется в намагничении. Связь маг-

нитных явлений с электрическими была впервые установлена Эрстедтом, показавшим, что электрический ток оказывает ориентирующее действие на магнитную стрелку, т.е. создает магнитное поле, по существу тождественное с полем обыкновенного магнита. Далее выяснилось, что и обратно магнит оказывает действие на проводник с электрическим током. Вслед за взаимодействием между электрическими токами и магнитами обнаружилось, что и электрические токи сами по себе оказывают друг на друга такое же действие, как и магниты. Основные законы взаимодействия электрических токов, которые были рассмотрены нами выше, были установлены французскими физиками Био, Саваром и в особенности Ампером. Именно последний показал, что замкнутый электрический ток по действиям, производимым им на другие токи (или магниты) или испытываемым со стороны последних, эквивалентен магниту. Эквивалентность магнитов и токов привела Ампера к мысли о полном упразднении магнетизма как самостоятельного явления, т.е. о сведении его к взаимодействию электрических токов, циркулирующих в намагниченном веществе. Исходя из гипотезы Вебера о молекулярных магнитиках, Ампер предложил трактовать их как *элементарные молекулярные токи*, т.е. токи, циркулирующие внутри молекул и отличающиеся от обычных токов только *отсутствием сопротивления*, т.е. следовательно способностью оставаться неизменными неограниченно долгое время.

Наконец, в начале XX века, в связи с развитием электронной теории, выяснилось, что молекулярные токи Ампера образуются вращательным движением отдельных электронов в атомах. При этом вначале имелось в виду лишь обращение электронов вокруг центрального тела атома — положительного ядра. В последнее же время выяснилось, что, помимо этого обращения, электроны обладают вращением около собственной оси, также сообщаящим им свойства магнитиков, и что именно от этого осевого, а не орбитного вращения электронов зависит свойство сильно-магнитных веществ, каковыми

являются железо и другие „ферромагнитные“ тела, как, напр., кобальт, никель и т. д.

Связь магнитных свойств с вращательным движением электронов была особенно отчетливым образом установлена опытом *Эйнштейна* и *де Гааса*, показавшим, что перемагничение железного стержня вызывает его вращение в ту или другую сторону, а также опытом *Барнета*, установившим, что вращение тела вокруг оси оказывает на него такое же намагничивающее влияние, как и внешнее магнитное поле, параллельное этой оси. Возможно, что в этом явлении кроется причина *земного магнетизма*, а также намагничения Солнца и, повидимому, всех других небесных тел, обладающих осевым вращением. Таким образом отдельные атомы с быстро обращающимися в них электронами или даже отдельные электроны, вращающиеся вокруг собственной оси, ведут себя в этом случае совершенно так же, как маленькие волчки или жирокопические компасы (при медленном вращении вокруг некоторой оси подобного волчка, быстро вращающегося вокруг собственной оси, последняя стремится повернуться в направлении первой оси). Следует, впрочем, заметить, что магнитное поле земного шара во много миллиардов раз сильнее того магнитного поля, которое по своему ориентирующему действию было бы эквивалентно вращению земли вокруг оси.

Как впервые показали опыты *Вейсса*, магнитный момент отдельных атомов, ионов или электронов, подобно электрическому заряду ионов, может принимать лишь значения, равные или кратные некоторой минимальной величине, представляющей собой как бы атом магнитного момента и называемой *магнетонном*. Это обстоятельство указывает на то, что размеры и наклонность орбит, описываемых электронами в атомах, не могут изменяться непрерывным образом, но образуют некоторую дискретную совокупность различных возможностей.

Не углубляясь в рассмотрение причин этой дискретности (относящихся к квантовой теории строения атомов,

подробнее см. *энергия*), мы перейдем теперь к обзору важнейших магнитных свойств материальных тел. Последние с точки зрения этих свойств обычно делятся на 3 класса, а именно: на сильно магнитные, или *ферромагнитные*, на *парамагнитные* и *диамагнитные*. Первые могут сохранять магнитный момент и в отсутствии внешнего поля (остаточное намагничение), тогда как вторые и третьи могут намагничиваться лишь в присутствии внешнего магнитного поля (источником которого служит обычно электрический ток). При этом парамагнитные тела намагничиваются в направлении магнитного поля, тогда как диамагнитные—в диаметрально противоположном направлении. Это различие проявляется внешне в том, что парамагнитные тела втягиваются магнитным полем (т. е. притягиваются к его источникам), тогда как диамагнитные—выталкиваются им.

Сущность различия между пара- и диамагнитными телами лежит, как показал *Ланжевэн*, в совершенно различном *механизме* намагничения в обоих случаях. В случае парамагнитных веществ механизм этот сводится к ориентировке частиц, обладающих постоянным отличным от нуля магнитным моментом и способных вращаться независимо друг от друга (ими могут быть молекулы, атомы или отдельные электроны). Ориентирующему влиянию внешнего магнитного поля противостоит влияние *теплового движения*, стремящегося разбросать магнитные оси этих частиц совершенно беспорядочным образом. Результирующая степень ориентации, определяемая величиной *намагничения*, т. е. магнитным моментом единицы объема, зависит в этом случае от отношения напряженности магнитного поля  $H$  к абсолютной температуре  $T$  и при не слишком больших значениях отношения  $\frac{H}{T}$  оказывается прямо пропорциональной ему (закон *Кюри-Ланжевэна*).

В случае диамагнитных тел, как показал тот же *Ланжевэн*, мы имеем дело не с ориентацией готовых магнетиков, а с явлением *электромагнитной индукции* в отдельных атомах или молекулах. Представим себе последние,

следуя Амперу, в виде очень маленьких идеальных проводников (т. е. проводников, не обладающих вовсе сопротивлением) и предположим, что при нормальных условиях никакого тока в них нет. При внесении подобных частиц в магнитное поле или при создании последнего, появляются рассмотренные нами выше индукционные электродвижущие силы, которыми создаются молекулярные токи, сообщающие частицам свойства магнитиков. При этом если последние оказываются направленными в сторону противоположную той, в которую поле стремилось бы их ориентировать (принцип Ленца). Заменяя представление об идеальном молекулярном проводнике представлением об атоме, образованном вращением электронов вокруг положительного ядра, мы получаем вместо индукционных амперовых токов некоторое изменение в скорости обращения электронов по их орбитам, вызывающее такой же добавочный магнитный момент, как и эти токи. Если при нормальных условиях результирующий магнитный момент атома равняется нулю (благодаря компенсации магнитного действия разных электронов) или если эти моменты, несмотря на присутствие поля, остаются беспорядочно ориентированными (что, напр., может иметь место при высокой температуре), то в результате действия магнитного поля тело, образованное рассматриваемыми атомами, намагничивается в направлении, противоположном полю. В общем случае наличия начального момента у атомов и ориентации их полем, диамагнитный эффект налагается на парамагнитный, обычно ослабляя, а иногда и совершенно маскируя его.

Парамагнитный эффект представляет собой полный аналог ориентационной поляризации диэлектриков, а диамагнитный аналогичен деформационной поляризации последних (ср. гл. I, § 7). При этом статической деформации, выражающейся в смещении электронных орбит под действием электрических сил, соответствует в магнитном случае так называемое *прецессионное* вращение этих орбит вокруг магнитного поля, т. е. медленное вращение неискаженных орбит

вокруг прямой, проходящей через центр атома в направлении поля. Следует заметить, что действие магнитного поля, после установления его, сводится лишь к *поддержанию* этой („лармовской“) прецессии, тогда как создается она теми электрическими силами, которыми сопровождается создание магнитного поля или введение тела в него.

В случае ферромагнитных тел, так же как и в случае парамагнитных, намагничение сводится к чисто *ориентационному* эффекту. Различие между ними сводится к тому, что в первом случае основным фактором, обуславливающим эту ориентацию, является не внешнее магнитное поле, как во втором, но особого рода *внутреннее* или *молекулярное поле* (по терминологии Вейсса). Последнее имеет чисто *электрическое* происхождение и лишь *проявляется* в стремлении одинаково сориентировать соседние элементарные магнитики, которыми, как показали новейшие исследования, являются в случае ферромагнитных металлов отдельные свободные электроны.

У кристаллов кубической системы, к которым принадлежат ферромагнитные металлы, это направление остается совершенно неопределенным. При наличии же незначительных местных искажений кристаллической решетки оно определяется в каждом месте характером этой деформации или соответствующими внутренними упругими напряжениями. Поскольку последние распределены в теле неправильным образом, результирующее намагничение в среднем для каждого небольшого объема тела исчезает. Таким образом тело в целом, несмотря на наличие в нем „спонтанного“ намагничения, представляется ненамагниченным (Вейсс).

При отсутствии этих внутренних напряжений сколь угодно слабое внешнее поле сразу же повернуло бы все магнитики в своем собственном направлении, так как будучи уже ориентированы по отношению друг к другу они без всякого сопротивления повернулись бы в указанном им направлении, — подобно тому, как взвод

солдат поворачивается по приказанию командира.

При наличии же внутренних напряжений, поворот магнетиков в отдельных однородных областях может осуществляться лишь постепенно, путем борьбы внешнего магнитного поля с ориентирующим влиянием местного искажения решетки (напр., растяжения или сжатия ее в том или ином направлении). Исследование этого вопроса (*Беккер*) показывает, что зависимость результирующего намагничения от внешнего поля не является однозначной функцией последнего, но оказывается различной при возрастании и при последующем убывании

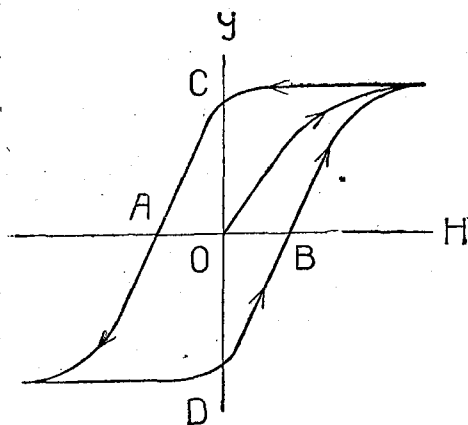


Рис. 16.

поля (с переменной направления его на противоположное). Это явление, представляющее собой одну из характерных особенностей ферромагнитных тел, называется *гистерезисом*. Кривая гистерезиса изображена на рис. 16. На горизонтальной оси отложены значения поля (магнитной напряженности), а на вертикальной — намагничения (магнитного момента единицы объема). Отрезок *OC* представляет собой величину *остаточного намагничения* при постепенном убывании поля до нуля в одном направлении (влево), а отрезок *OD* — то же самое для другого направления. Отрезки *OA* и *OB* определяют так называемую «коэрцитивную силу», т. е. то внешнее магнитное поле, которое необходимо для ликви-

дации остаточного намагничения. Опыт показывает, в согласии с набросанной выше теорией, что ширина гистерезисной петли тем больше, чем больше внутренние напряжения в соответствующем теле.

При более тщательном исследовании оказывается, что с изменением поля *H* намагничение изменяется не плавным образом, как это изображено на кривой, но скачкообразно, при чем величина скачков (соответствующих мгновенному перемагничению маленького объема тела) особенно велика на крутых участках гистерезисной петли. Это явление носит название эффекта *Баркгаузена*.

Ферромагнитные тела имеют большое значение в электротехнике по той причине, что они позволяют в чрезвычайно высокой степени усиливать магнитные поля, создаваемые слабыми или не очень сильными электрическими токами, а вместе с тем и различные пондеромоторные и индукционные эффекты, связанные с этими полями. Это усиление сводится к тому, что к внешнему полю, ориентирующему элементарные магнетики, присоединяется то магнитное поле, которое ими самими создается и которое может превышать первое во много тысяч раз. В случае пара- и диамагнитных тел вторичное поле составляет обычно лишь ничтожную долю (порядка одной стотысячной) первичного. Следует заметить, что ферромагнитные свойства сохраняются у железа и других металлов этого типа лишь в твердом состоянии и то лишь до определенной «критической» температуры — так называемой температуры *Кюри*, — выше которой они ведут себя как обыкновенные парамагнитные тела. Роль температуры или, вернее, теплового движения сводится в этом случае к противодействию ориентирующему влиянию внутреннего или молекулярного поля. При температуре Кюри это ориентирующее влияние исчезает, и тело из ферромагнитного состояния переходит в парамагнитное.

Мы уже указывали выше на аналогию намагничения с поляризацией диэлектриков. Вектору поляризации



$\vec{P}$  (т.е. электрическому моменту единицы объема) во втором случае соответствует вектор намагничения  $\vec{I}$  в первом. При этом поверхностной плотности связанного электрического заряда, определяемой нормальной проекцией вектора  $\vec{P}$ , соответствует поверхностная плотность связанного электрического тока, определяемая тангенциальной (т.е. параллельной поверхности) проекцией вектора  $\vec{I}$ . Заменяя амперовы молекулярные токи молекулярными магнетиками и поверхностную плотность тока поверхностной магнитной плотностью, можно построить математическую теорию намагничения по тому же шаблону, который уже был установлен нами в случае электрической поляризации. Т. обр. вводится понятие  $\vec{H}$  (средней) магнитной напряженности внутри намагниченного тела  $\vec{H}$  и магнитной индукции  $\vec{B} = \vec{H} + 4\pi \vec{I}$ , далее — о магнитной восприимчивости тела  $\chi = \frac{I}{H}$  и магнитной проницаемости  $\mu = \frac{B}{H}$ , играющей роль диэлектрической постоянной. При этом для векторов  $\vec{H}$  и  $\vec{B}$  устанавливаются те же самые граничные условия, т.е. непрерывность тангенциальной проекции первого и нормальной проекции второго, как и для векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{D}$  в случае поляризации диэлектриков.

Однако, если с точки зрения фиктивных молекулярных магнетиков перейти на точку зрения реальных молекулярных токов, то оказывается, что вектор  $\vec{B}$ , называемый магнитной индукцией, на самом деле представляет собой среднее магнитное поле в теле, соответствующая в этом смысле не вектору  $\vec{D}$ , но вектору  $\vec{E}$  в случае диэлектриков; вектор же  $\vec{H} = \vec{B} - 4\pi \vec{I}$  представляет собой вспомогательную величину, соответствующую вектору электрической индукции  $\vec{D} = \vec{E} + 4\pi \vec{P}$ , но с обратным знаком при векторе поляризации.

Кусок железа или какого-либо другого ферромагнитного вещества, намагничивающийся под влиянием электрического тока, называется *электромагнитом*. Для намагничения железного стержня его обычно вводят внутрь катушки, на которую намотана в определенном направлении изолированная проволока, и пропускают через последнюю электрический ток. Подобная катушка называется *соленоидом*. Если длина ее велика в сравнении с толщиной, то внутри нее получается практически однородное магнитное поле с напряженностью

$$H = 4\pi iw, \quad (27)$$

где  $i$  — сила тока, а  $w$  — число витков проволоки, приходящихся на единицу длины катушки. При наличии в катушке сердечника с магнитной проницаемостью  $\mu$  поле внутри катушки увеличивается в  $\mu$  раз. При этом, однако, говорят, что изменилось не поле, а вектор индукции, при отсутствии сердечника равнявшийся  $\vec{H}$ , а при наличии его принимающий значение  $\vec{B} = \mu \vec{H}$ .

Коэффициент самоиндукции подобной катушки может быть вычислен приближенно на основании следующих соображений. Каждый виток катушки пронизывается магнитным потоком  $\mu HS$ , исходящим преимущественно от других витков, где  $S$  площадь поперечного сечения катушки. Обозначая длину ее через  $l$ , мы видим, что через все витки проходит магнитный поток

$$\Phi = \mu HSlw = 4\pi\mu w^2 Sl.$$

Отсюда следует, что коэффициент самоиндукции рассматриваемой катушки равен

$$L = 4\pi\mu w^2 V, \quad (28)$$

где  $V = Sl$  объем ее, или, вернее — внутреннего пространства, где сосредоточено поле  $H$ . Заметим, что вне катушки последнее практически исчезает.

Подставляя это выражение в формулу  $T = \frac{1}{2} Li^2$  для магнитной энергии тока и заменяя в ней  $w$  через  $\frac{H}{4\pi}$  согласно (27), получаем

$$T = \frac{\mu H^2}{8\pi} V.$$

Таким образом мы можем себе представить, что энергия тока сосредоточена в сердечнике катушки и распределена в ней с объемной плотностью

$$\frac{\rho H^2}{8\pi} \quad (29)$$

Это выражение совершенно аналогично с уже известным нам выражением  $\frac{\epsilon E^2}{8\pi}$  для объемной плотности

электрической энергии в диэлектрике с диэлектрической постоянной  $\epsilon$ . Если на рассмотренную выше катушку намотать проволоку, изолированную от первой, то мы получим прибор, который в зависимости от характера тока, пропускаемого через первичную обмотку, является *индукционной катушкой* (Рюмкорфа) или *электрическим трансформатором* (см. *спираль Рюмкорфа*). В первом случае через первичную обмотку пропускается ток постоянного направления, прерываемый через определенные промежутки времени (путем разрыва цепи, по которой он течет). При включении этого тока во вторичной обмотке индуктируется ток обратного направления; наоборот, при выключении его — ток того же самого направления. Эти индукционные токи тем сильнее — но вместе с тем и кратковременнее, — чем быстрее происходит изменение первичного тока. Обычно спадание его при выключении происходит гораздо быстрее нежели нарастание при включении. Поэтому во вторичной обмотке индуктируется гораздо более сильный ток при выключении первичного тока, нежели при его включении. Индукционная электродвижущая сила тем больше, чем больше число витков во вторичной обмотке. Обычно последнее берется чрезвычайно большим, — так, чтобы разность потенциалов, появляющаяся на концах вторичной цепи (в разомкнутом состоянии) при размыкании первичного тока была бы достаточна для проскакивания искры желаемой длины (см. рис. 17). Заметим, что при размыкании первичного тока между концами его цепи также проскакивает искра, вызываемая электродвижущей силой *самоиндукции*, которая возбуждается в нем вслед-

ствие быстрого убывания силы тока. При замыкании тока, искры, разумеется, не происходит. В этом случае, при наличии постоянной первичной электродвижущей силы  $V$ , сила тока возрастает сравнительно медленно, постепенно приближаясь к предельной величине  $i = \frac{V}{R}$ , соответствующей данному сопротивлению цепи  $R$ . Скорость этого возрастания определяется отношением сопротивления к коэффициенту самоиндукции цепи  $L$ . В случае обычных цепей она настолько

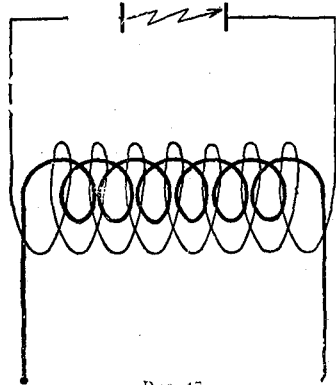


Рис. 17

мала, что нормальный ток  $i$  устанавливается в незначительную долю секунды. Заметим, что разность между этим током и тем током  $i(t)$ , который фактически течет в цепи при замыкании ее, называется *экстратоклом замыкания*. Аналогичным образом ток, текущий в цепи после ее размыкания (и прорывающийся через воздух в виде искры), называется *экстратоклом размыкания*. Само собой разумеется, что подобные экстратоклы наблюдаются не только в цепи катушки, но и во всякой другой цепи.

На ряду с постоянными токами в электротехнике имеют чрезвычайно широкое применение так назыв. *переменные токи*. Под этим названием подразумевается обычно не всякий ток переменной силы или направления, но ток, сила и направление которого колеблется *маятниковобразно* или *гармонически* по формуле

$$i = i_0 \sin \left( \frac{2\pi t}{T} + \alpha \right) = i_0 \sin (\omega t + \alpha), \quad (30)$$

где  $i_0$  представляет собой амплитуду тока,  $T$ —период колебаний, а  $\alpha$ —так назыв. начальную фазу. Заметим, что величина обратная периоду  $f = \frac{1}{T}$ , т. е. равная числу колебаний, или „циклов“ в единицу времени, называется *частотой*, а пропорциональная ей величина  $\omega = 2\pi f$ —угловой частотой. Таким образом „переменный ток“ представляет собой по существу *электрические колебания* синусоидального характера, или, точнее, гармоническое колебательное движение электрических зарядов в проводнике.

Источником переменного тока служит обычно динамомашинка, схема которой была уже рассмотрена нами в § 3. Мы видели, что при вращении рамки (якоря) в однородном магнитном поле, в нем индуцируется э.д. сила, равная  $V = \frac{1}{c} SH\omega \sin\varphi$ , или, если положить здесь  $\varphi = \omega t = \frac{2\pi t}{T}$  и  $V_0 = \frac{\omega}{c} SH$ , то  $V = V_0 \sin \omega t$ . (31)

Таким образом, эта э.д. сила в смысле своей зависимости от времени имеет такой же колебательный характер, как и переменный электрический ток, определяемый формулой (30). Естественно, что именно такой ток ею и вызывается. Если бы проводник, в котором возбуждается электродвижущая сила (31), не имел бы вовсе омического сопротивления, то сила вызываемого ею тока должна была бы определяться из условия равенства и противоположности силы э.д. самоиндукции, связанной с этим током и равной  $-\frac{1}{c} L \frac{di}{dt}$ . Равенство  $\frac{1}{c} L \frac{di}{dt} = V$  на самом деле выполняется, если положить в формуле (30)  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ , т. е.  $i = i_0 \cos \omega t$  и

$$i_0 = \frac{c}{\omega L} V_0. \quad (32)$$

Таким образом, в рассматриваемом идеальном случае (проводника без сопротивления) мы получаем переменный электрический ток, сдвинутый по фазе относительно электродвижущей силы на четверть периода, при

чем роль омического сопротивления, определяемого отношением э.д. силы к силе тока, играет величина  $\frac{\omega}{c} L$ , называемая *индуктивным сопротивлением*.

В общем случае при наличии у проводника омического сопротивления  $R$  оно складывается с индуктивным сопротивлением, но не арифметически, а „геометрически“, т. е. так, как складываются друг с другом два катета прямоугольного треугольника в его гипотенузу. Таким образом, *полное*<sup>4)</sup> сопротивление  $R'$ , определяемое как отношение амплитуды э.д. силы  $V_0$  к амплитуде вызываемого ей тока  $i_0$ , выражается в этом случае формулой

$$R' = \sqrt{R^2 + \left(\frac{\omega}{c} L\right)^2}. \quad (33)$$

При этом угол сдвига фазы тока по отношению к э.д. силе, т. е. величина  $\alpha$  в формуле (30), оказывается меньшей  $\frac{\pi}{2}$ . Можно показать, что он равен одному из двух острых углов в прямоугольном треугольнике с катетами  $R$  и  $\frac{\omega}{c} L$ , а именно тому из этих углов, который обращается в нуль при  $L = 0$  и, следовательно, в прямой угол при  $R = 0$ .

Предыдущие соотношения значительно усложняются, когда рассматриваемый проводник, в котором действует э.д. сила  $V$ , находится в *индуктивной связи* с каким-нибудь другим замкнутым проводником. „Индуктивная связь“ двух проводников или контуров означает наличие *взаимной индукции* между ними и измеряется отношением коэффициента взаимной индукции их  $L_{12}$  к среднему геометрическому из коэффициентов самоиндукции (величина  $k = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11} L_{22}}}$  называется коэффициентом связи). Максимальная связь (с коэффициентом близким к 1) осуществляется в рассмотренной выше схеме катушки с двумя обмотками, намотанными одна на дру-

4) В технике, обычно, омическое, индуктивное и полное сопротивления соответственно называются: активным, реактивным и кажущимся.

гую. Впрочем, при наличии замкнутого (кольцеобразного) железного сердечника, магнитные силовые линии проходят практически полностью внутри последнего, так что в этом случае индуктивная связь между обеими обмотками не уменьшается, если они наматываются вокруг различных участков сердечника (рис. 18). При таких условиях результирующие э.д. силы  $V_1$  и  $V_2$ , индуцированные в обеих обмотках и складывающиеся из силы самоиндукции и взаимной индукции ( $V_1 = V_{11} + V_{12}$ ,  $V_2 = V_{22} + V_{21}$ ), могут быть непосредственно вычислены, исходя из величины  $\Phi$  полного магнитного потока, проходящего через любое поперечное сечение сердечника по формулам

$$V_1 = -\frac{1}{c} w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad V_2 = -\frac{1}{c} w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (34)$$

где  $w_1$  и  $w_2$  обозначают числа витков в соответствующих обмотках. Отсюда следует, что эти индукционные э.д. силы относятся друг к другу, как числа витков  $w_1$  и  $w_2$ .

Если в одной из обмоток — „первичной“ — действует синусоидальная э.д. сила  $V$  типа (31), исходящая из какого-либо внешнего источника (напр., динамомашинны), то э.д. сила того же типа — но с другой амплитудой — индуцируется во вторичной обмотке. Эта э.д. сила  $V_2$  называется преобразованной, или „трансформированной“ по отношению к исходной  $V$ , а самый прибор (схематически изображенный на рис. 18) называется *электрическим трансформатором*. Если первичная обмотка состоит из небольшого числа оборотов толстой проволоки с маленьким сопротивлением, то внешняя э.д. сила  $V$ , действующая в ней, практически уравнивается той, которая в ней индуцируется  $V_1$ . Таким образом

отношение  $\frac{V_2}{V_1}$ , характеризующее трансформатор, практически совпадает с

отношением  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{w_2}{w_1}$ . Если, следовательно,  $w_2$  очень велико в сравнении с  $w_1$ , то преобразованная э.д. сила  $V_2$  во вторичной обмотке оказывается очень большой по сравнению с пер-

вичной. В этом случае трансформатор может преобразовывать низкое напряжение  $V$  в высокое  $V_2$ . При обратном соотношении числа витков мы получаем обратное соотношение: трансформатор не повышает, а, наоборот, понижает напряжение, приложенное к первичной обмотке.

Мы не можем останавливаться здесь на вопросе о различных технических применениях переменных электрических токов. Одним из наиболее широко известных, но отнюдь не специфическим, является применение их к электрическому освещению (городские

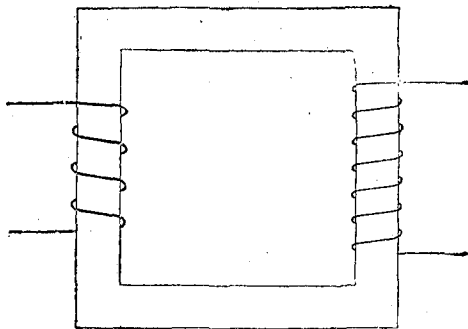


Рис. 18.

электрические станции дают обычно переменный ток с частотой 50). В связи с этим необходимо отметить, что тепловой эффект переменного тока, т.е., другими словами, количество тепла, выделяющегося при его прохождении за единицу времени, выражается не произведением силы тока  $i$  на э.д. силу  $V$ , как в случае постоянного тока, а формулой

$$Q = \frac{1}{2} i_0 V_0 \cos \alpha, \quad (35)$$

т.е. половиной произведения амплитуд тока и э.д. силы на косинус угла, характеризующего сдвиг фазы между ними. В технике переменных

токов величины  $\frac{i_0}{\sqrt{2}}$  и  $\frac{V_0}{\sqrt{2}}$  называются „эффективными“ значениями силы тока и э.д. силы, при чем произведение  $\frac{i_0}{\sqrt{2}} \cos \alpha$ , характеризующее ту часть тока, с которой связан тепловой эффект, называется *активной*, а

произведение  $\frac{i_0}{2} \sin \alpha$  — реактивной слагающей тока. Эти обозначения соответствуют представлению обеих слагающих тока, как катетов прямоугольного треугольника, соответственно параллельного (т.-е. совпадающего по фазе) и перпендикулярного (т.-е. сдвинутого по фазе на  $90^\circ$ ) к внешней э.-д. силе. Переменные токи применяются, на ряду с постоянными, для превращения электрической энергии не только в тепловую, но и в механическую, т.-е. в различного рода *электродвигателях* (моторах), в рассмотрение которых мы не можем здесь вдаваться (подробнее см. *электротехника*).

Заметим, что переменные токи могут быть легко преобразованы в постоянные или, вернее, в токи постоянного направления (но колеблющейся величины) при помощи приборов, называемых *умформерами*, или *преобразователями*. Заметим также, что динамомашини переменного тока называются часто *альтернаторами*.

В заключение мы перечислим вкратце различные измерительные приборы, применяемые в электромагнетизме. Важнейшими из них являются приборы, служащие для измерения силы тока по производимому им магнитному (электрокинетическому) действию. В случае слабых токов эти приборы называются *гальванометрами*, а в случае сильных — *амперметрами*. Сила тока определяется в них по механическому действию, производимому одной частью цепи (неподвижной) на другую (подвижную) или же на постоянный магнит. Гальванометры и амперметры могут быть приспособлены к измерению разностей потенциала (электро-движущих сил), при чем в этом случае они называются *вольтметрами*. В технике переменных токов широкое применение имеют приборы, служащие для измерения мощности (обычно — по тепловому эффекту) — так называемые *ваттметры*, а также электрической энергии, потребляемой за данное время (электрические счетчики).

Заметим, наконец, что в учении об электромагнитных явлениях часто пользуются особой, так назыв. *элек-*

*тромагнитной системой единиц*, основывающейся на электромагнитной единице электрического тока или заряда, которая была введена нами в начале этой главы и которая в  $c = 3 \cdot 10^{10}$  раз больше соответствующей электростатической единицы. Таким образом, э.-д. единица заряда равна 10 кулонам, а э.-м. силы тока — 10 амперам. Сохраняя в качестве единицы работы (энергии) 1 эрг, мы для э.-м. единицы потенциала получаем величину в  $3 \cdot 10^{10}$  раз меньшую электростатической, т.-е. равную одной стомиллионной вольты. Практической единицей напряженности магнитного поля служит 1 *гаусс*, равный одной десятой соответствующей э.-м. единицы. Наконец, практической единицей самоиндукции и взаимной индукции является так назыв. *генри* =  $10^9$  см. Напомним, что в электромагнитной системе единиц коэффициент самоиндукции (или взаимной индукции) измеряется в сантиметрах, так же как емкость — в электростатической системе единиц (см. *электротехника — электрические измерительные приборы*).

Глава IV. *Электромагнитные волны и электромагнитная теория света.* § 1. *Ток смещения и распространение электромагнитных действий со скоростью света.* Явление электромагнитной индукции в неподвижном проводнике связано с наличием этого проводника лишь в смысле своего обнаружения, а не происхождения. Мы можем и должны себе представить, что то электрическое поле, которое проявляется в виде индукционной э.-д. силы в проводнике, сохраняется и при отсутствии его, являясь непосредственным следствием тех процессов, которыми обусловливается э.-м. индукция в рассматриваемом случае. Процессы эти, как мы видели выше, сводятся в конечном счете к ускоренному движению электрических зарядов; индукционное электрическое поле — или, как мы его назвали, *фарадеевское поле* — обусловливается ускорением этого движения в таком же самом смысле, в каком магнитное поле обусловливается его скоростью. Поскольку, однако, в общую формулировку закона ин-

дукции, т.е. в уравнение

$$V = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

в качестве фактора, определяющего фарадеевское поле, входит не движение электрических зарядов, а лишь обусловливаемое ими магнитное поле, мы можем совершенно отвлечься от этого движения, представляющего собой основную причину явления, и рассматривать фарадеевское электрическое поле как *непосредственное* следствие изменения магнитного поля во времени, согласно уравнению (1). Но если переменное магнитное поле может в этом смысле являться непосредственным источником электрического,

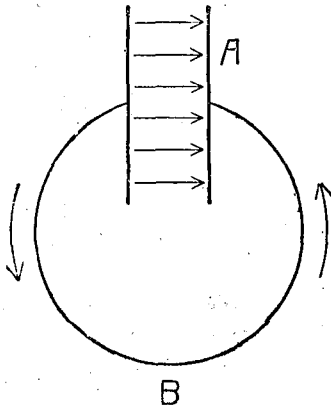


Рис. 19.

то, естественно, возникает вопрос — не может ли переменное электрическое поле являться непосредственным источником магнитного поля, аналогичного фарадеевскому? Этот вопрос был поставлен Максвеллом в 70-ых годах прошлого века и решен им в утвердительном смысле на основании следующих соображений.

Представим себе плоский конденсатор А, пластинки которого, после предварительного заряжения его, соединяются друг с другом с наружной стороны металлической проволокой В (рис. 19). При этом конденсатор должен разрядиться; другими словами, по проволоке потечет электрический ток в направлении от положительной пластинки к отрицательной, что сопровождается уменьшением заряда его обкла-

док, а, следовательно, и электрического поля, действующего между последними. Это изменение электрического поля внутри конденсатора как бы заменяет собой или, вернее, дополняет электрический ток, текущий в проводнике, превращая его из незамкнутого „как бы“ в замкнутый. Исходя из представления (по существу неправильного) о том, что всякий ток должен быть непременно замкнутым, Максвелл предложил трактовать переменное электрическое поле как особого рода ток, который он в отличие от обыкновенного „тока проводимости“ (кондукционного) назвал *током смещения*. При этом физический смысл идеи Максвелла заключался в тождественности магнитных действий тока того и другого рода, т.е., иными словами, в предположении, что переменное электрическое поле создает магнитное поле того же типа, как и обыкновенный электрический ток.

Эти представления могут быть легко уточнены. Обозначая заряд положительной пластинки конденсатора через  $e$ , а площадь ее (равную, конечно, площади отрицательной) через  $S$ , мы имеем для напряженности электрического поля внутри конденсатора уже известную нам формулу  $E = 4\pi \frac{e}{S}$ . Таким образом,  $e = \frac{1}{4\pi} ES = \frac{1}{4\pi} \Psi$ , где  $\Psi = ES$  представляет собой электрический поток, проходящий через какое-либо сечение конденсатора. Принимая во внимание, что сила тока в электромагнитных единицах равна  $i = \frac{1}{c} \frac{de}{dt}$ , мы получаем соотношение

$$i = \frac{1}{4\pi c} \frac{d\Psi}{dt} \quad (2)$$

Эта формула показывает, что роль силы тока играет быстрота изменения электрического потока между обоями концами разомкнутого проводника, деленная на  $4\pi c$ . Аналогичным образом плотности тока, т.е. силы тока, отнесенной к единице поперечного сечения, соответствует величина

$$j = \frac{1}{4\pi c} \frac{dE}{dt} \quad (3)$$

Обыкновенный замкнутый электрический ток окружен, как мы знаем, магнитным полем, силовые линии которого представляют собой замкнутые кольца, охватывающие контур тока. Если вычислить это поле согласно закону Био-Савара и составить для какого-нибудь контура, охватывающего контур тока, величину, соответствующую электродвижущей силе  $V$  в случае фарадеевского электрического поля, то оказывается, что эта величина  $V'$ , называемая по аналогии „магнитодвижущей силой“, связана с силой тока чрезвычайно простым соотношением

$$V' = 4\pi i. \quad (4)$$

Заметим, что „магнитодвижущая сила“  $V'$  для какого-нибудь контура может быть определена как сумма произведений элементов этого контура  $dS$  на параллельную им слагающую магнитной напряженности (при определенном направлении обхода контура). В случае незамкнутого контура ее можно было бы определить как разность магнитных потенциалов на его концах.—Формулу (4) нетрудно проверить на частном примере, а именно, если рассматриваемый контур совместить с одной из магнитных силовых линий в непосредственной близости к проводнику с током. Эти линии, как мы знаем, имеют форму кругов, при чем на расстоянии  $r$  от оси проводника, т.е. для круга радиуса  $r$ , магнитная напряженность  $H$  равна  $\frac{2i}{r}$ . Мы получаем, таким образом,  $V' = H \cdot 2\pi r = 4\pi i$ , в согласии с формулой (4).

Заменяя в этой формуле силу тока  $i$  ее выражением (2), мы приходим к формуле

$$V' = \frac{1}{c} \frac{d\psi}{dt}. \quad (5)$$

совершенно аналогичной формуле (1), выражающей закон электромагнитной индукции. Нетрудно проверить, что они на самом деле отличаются только знаком. Это различие, как мы увидим дальше, имеет весьма существенное значение. Итак, мы видим, что убывающее электрическое поле создает вокруг себя магнитное поле, по своей структуре тождественное с электрически́м полем, создаваемым возрастаю-

щим магнитным полем (и наоборот).

Закон, выражаемый формулой (5), можно было бы назвать законом „магнитно электрической индукции“<sup>1)</sup>, считая магнитодвижущую силу  $V'$  „индуцированной“ изменением электрического потока через соответствующий контур.

Следует заметить, что формулы (4) и (5) представляют собой два предельных частных случая, первый из которых соответствует присутствию одного лишь тока проводимости (т.е. потока электрических зарядов), а второй—одного лишь тока смещения (т.е. переменного электрического потока). В общем случае наличия того и другого формула заменяется следующей:

$$V' = 4\pi i + \frac{1}{c} \frac{d\psi}{dt}. \quad (6)$$

Следует заметить так же, что здесь  $i$  и  $\psi$  представляют собой потоки через тот контур, для которого определяется магнитодвижущая сила  $V'$ . Таким образом, если последний не охватывает контура тока  $i$ , а также в общем случае при отсутствии движущихся зарядов в рассматриваемой области пространства, формула (6) сводится к (5).

Ограничиваясь этим случаем, мы получаем следующую картину своеобразного сцепления между электрическим и магнитным полем. Изменение во времени одного из них вызывает появление другого. При этом магнитные силовые линии, образующиеся вокруг возрастающего электрического поля, охватывают его в виде колец в том же направлении, как и в случае обыкновенного тока (рис. 20а), а электрические силовые линии, образующиеся вокруг возрастающего магнитного поля, охватывают его также кольцеобразно, но в противоположном направлении. Исчезновение электрического поля сопровождается появлением магнитного, исчезновение магнитного—появлением электрического. Результатом этого взаимного порождения обоих полей является—как показал Максвелл (см. ниже)—перемещение их в пространстве со скоростью  $c$ . Это перемещение,

<sup>1)</sup> В настоящее время в советской литературе этот закон, в большинстве случаев, называется законом полного тока.

или „распространение“ электромагнитного поля из некоторой области, где оно было сосредоточено в начальный момент времени, происходит по тому же самому закону, которым определяется распространение какой-либо деформации (сжатия, растяжения и т. д.) в упругой однородной среде, напр. в воздухе. Как известно, в последнем случае всякое нарушение равновесия распространяется обычно в виде звуковых колебаний, или волн. Аналогичные колебания и волны—но не механического, а *электромагнитного* характера—могут распространяться в пустом пространстве из какого-либо очага,

Мысль об электромагнитной природе света была высказана *Фарадеем*, который пришел к ней весьма простым, но по существу совершенно неправильным путем. А именно, в своих исследованиях об электрических и магнитных явлениях Фарадей руководствовался представлением о том, что электрические и магнитные силы передаются от одного тела к другому не непосредственно через разделяющую их пустоту (подобное „действие на расстоянии“ казалось ему немислимым), но через некоторую промежуточную материальную среду, заполняющую пространство, которое нам кажется совершенно пустым (ср.

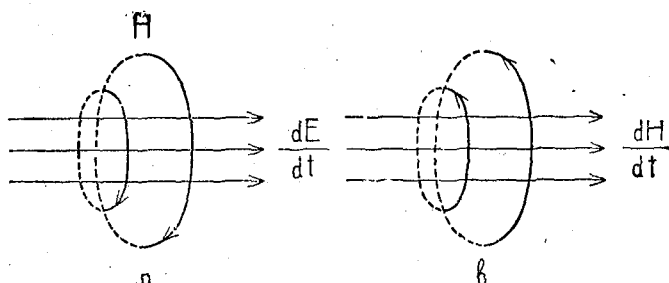


Рис. 20.

где имеются источники переменного (во времени) электрического и магнитного поля, т. е. колеблющиеся электрические заряды. Скорость  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/сек., с которой распространяются в окружающем пространстве электрические и магнитные силы (или, вернее, напряженности) и которая может быть определена из опыта как отношение электромагнитной единицы электрического заряда к электростатической, *в точности совпадает с непосредственно измеренной скоростью распространения света в пустоте.* Смысл этого совпадения, которое уже было отмечено нами выше, заключается, очевидно, в том, что свет представляет собой *электромагнитное явление*, т. е., другими словами, что световые колебания и волны представляют собой не что иное, как волнообразно распространяющиеся колебания электрических и магнитных полей, и что источниками света, вызывающими эти „силовые“ колебания, являются колеблющиеся электрические заряды (ср. свет, XXXVII, 563).

I главу, конец § 6). Подобная среда была введена еще за полтора века до Фарадея *Гейгенсом* в качестве передатчика световых действий и утвердилась в физике под названием светового (или мирового) *эфира* (ср. физика, XLIII, 312 сл.). Представлялось естественным не создавать новой специальной среды для передачи электромагнитных действий и возложить соответствующую обязанность на тот же самый эфир. Таким образом, гипотеза эфира послужила соединительным звеном между областями физических явлений, до того казавшихся совершенно различными—электромагнетизмом и оптикой. Из представления о том, что электромагнитные и световые действия передаются через один и тот же эфир, непосредственно вытекало, во-первых, что электромагнитные действия должны распространяться со скоростью света и, во-вторых, что световые колебания можно рассматривать как колебания электрических и магнитных сил. При дальнейшем углублении и матема-



тическом развитии идей Фарадея Макссуэл руководствовался той же самой гипотезой эфира как средоточия электромагнитных явлений, рассматривая электрические заряды и токи лишь как источники или очаги упругих напряжений и движений этой среды. Однако, логика вещей и опытные факты привели его к системе уравнений (по существу тождественных с приведенными выше уравнениями (1) и (6)), которые не могли быть согласованы ни с какими конкретными представлениями о механических свойствах эфира.

Некоторое время казалось, что сведения электромагнитных явлений к явлениям механическим, т. е. к движению и взаимодействию материальных частиц, принципиально невозможно и что теория Макссуэла приводит к необходимости замены старого механического мировоззрения новым электромагнитным, в котором основной реальностью является электромагнитное поле, существующее в пустом пространстве. Вскоре, однако, в связи с развитием электронной теории, выяснилось, что это поле существует не само по себе, но обуславливается элементарными заряженными частицами материи — электронами (и протонами), и что, следов., его можно рассматривать как простого *посредника* в действиях, оказываемых различными частицами друг на друга.

Таким образом, отвергнув гипотезу эфира, приведшую к представлению о конечной скорости распространения электромагнитных сил в пустом пространстве, и низведя электромагнитное поле на роль посредника между заряженными материальными частицами, физика *восстановила* колебавшееся было механическое мировоззрение, но не в прежней форме, где действие между частицами на расстоянии считалось *мгновенным*, а в новой форме, где это действие, поскольку по крайней мере оно определяется электрическим зарядом частиц, является *запаздывающим*.

Сведения всех физических действий к электрическим (электромагнитным) и установление того принципа, что они передаются через пустоту не мгновенно, а с конечной скоростью, и состав-

ляет основное отличие нового механического мировоззрения от старого<sup>1)</sup>.

§ 2. *Основы теории электромагнитного излучения.* Весьма распространенное представление об электромагнитных волнах, как о чем-то, существующем самостоятельно, совершенно не связанном с электрическими зарядами, в корне неправильно. Электромагнитные волны, как и всякое электромагнитное поле, обуславливаются электрическими зарядами. Покоющиеся заряды создают одно лишь кулоновское поле. Заряды, движущиеся прямолинейно и равномерно, создают, кроме того, магнитное поле Био-Савара. Наконец, заряды, движущиеся с некоторым *ускорением*, создают пропорциональное последнему электрическое поле, которое мы назвали „фарадеевским“, и непосредственно с ним связанное, также пропорциональное ускорению, магнитное поле, которое мы назовем *максуэловским*. Конечная скорость распространения электромагнитных действий выражается при этом в том обстоятельстве, что электрическая и магнитная напряженность в каждой точке пространства определяется положением, скоростью и ускорением данного заряда не в тот момент времени  $t$ , для которого эти напряженности определяются, а в некоторый *предшествующий* момент времени  $t'$ , когда расстояние заряда от рассматриваемой точки  $R(t')$  равнялось  $c(t - t')$ .

Это обстоятельство, которое обозначается как „запаздывание“ э.-м. действий, проявляется, конечно, лишь в том случае, когда заряд движется. В частности, при периодическом колебательном движении заряда, создаваемое им поле колеблется в каждой точке пространства с тем же самым периодом, но вообще говоря не синхронно, а с некоторой разностью фаз, тем большей, чем больше расстояние этой точки от заряда или, вернее, среднего его положения. Таким образом, рассматривая э.-м. поле в ряде точек, расположенных на различных расстояниях от последнего, мы полу-

<sup>1)</sup> Окончательное упрощение теории эфира связано с развитием *теории относительности* (см.), углубившей вместе с тем принципы новой „электро-механики“.

чим для одного и того же момента времени периодичность того же типа, как и в том случае, когда мы рассматриваем э.м. поле в данной точке для ряда последовательных моментов времени. Впрочем, пространственная периодичность, в отличие от временной, искажается постепенным убыванием поля—или, точнее, амплитуды его колебаний—с увеличением расстояния.

Эти соотношения в простейшем случае гармонического колебательного движения данного заряда могут быть выражены формулой вида

$$F = f(R) \sin \omega \left( t - \frac{R}{c} \right), \quad (7)$$

где  $F$  обозначает электрическую или магнитную напряженность в момент  $t$  на расстоянии  $R$  от заряда,  $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$  — „угловую частоту“ его колебаний, а  $f(R)$ —функцию, характеризующую зависимость амплитуды колебаний поля от расстояния. Разность  $t - \frac{R}{c}$  представляет собой эффективное время  $t'$ , о котором мы говорили выше и к которому относится положение заряда, действие которого определяется в момент  $t$ .

Полагая

$$cT = \lambda,$$

мы можем переписать выражение  $\omega \left( t - \frac{R}{c} \right)$  в виде  $2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{R}{\lambda} \right)$ . Отсюда видно, что величина  $\lambda$  играет по отношению к расстоянию  $R$  такую же роль, какую период колебаний  $T$  играет по отношению к времени  $t$ . Таким образом, для каждого момента времени формула (7) дает некоторое колебание поля в пространстве того же самого типа как и колебание во времени—если отвлечься от искажения, характеризуемого множителем  $f(R)$ —с периодом  $\lambda$ . Такого рода пространственные колебания называются, вообще говоря, *волнами*, а период их  $\lambda$  называется *длиной* волны. Картина, определяемая „фазовым множителем“  $\sin \omega \left( t - \frac{R}{c} \right)$ , представляет собой ряд концентрических сфер, характеризуемых определенными значениями „фазы“

$\omega \left( t - \frac{R}{c} \right) = 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{R}{\lambda} \right)$ ; с течением времени каждая из подобных сфер непрерывно расширяется во все стороны путем увеличения ее радиуса со скоростью  $c$ . Мы получаем, таким образом, шаровые волны, распространяющиеся со скоростью  $c$ .

Эти соображения применимы в принципе к любому из тех четырех типов э.м. полей, которые были указаны нами выше—т.е. кулоновому, био-саваровскому, фарадеевскому и максуэловскому полю. Однако, в электромагнитной теории понятие волн применяется исключительно к полям фарадей-максуэловского типа. Это объясняется тем обстоятельством, что последние убывают с расстоянием гораздо медленнее, нежели кулоновское и био-саваровское поле, а именно обратно пропорционально *первой* степени расстояния, а не второй степени, как последние. Таким образом, на больших расстояниях, т.е. там, где волнообразный характер распространения электромагнитных колебаний становится отчетливо выраженным [благодаря сравнительно медленному убыванию амплитудного множителя  $f(R)$ ], кулоновское и био-саваровское поля, преобладающие на малых расстояниях, совершенно ступшеваются перед фарадей-максуэловским. При этом, под „малым“ или „большим“ расстоянием следует понимать расстояние  $R$ , малое или большое по сравнению с длиной волны  $\lambda = cT$ . Заметим, что гармонически колеблющийся электрический заряд называется обычно *электрическим вибратором*, а зона, простирающаяся на расстоянии  $R > \lambda$ —*волновой зоной*.

Существенное различие между полями, убывающими обратно пропорционально квадрату расстояния и первой его степени, с точки зрения представления о волнах станет нам более ясным, если мы рассмотрим вопрос о количестве энергии, связанной с полем и распространяющейся наружу или, как говорят, излучающейся вместе с ним. С этой целью рассмотрим количество энергии, заключенной между двумя соседними волновыми поверхностями одинаковой

фазы, т.е. двумя сферами с радиусами  $R$  и  $R + \lambda$ , где  $R = ct$ . Если  $R$  велико в сравнении с  $\lambda$ , то объем рассматриваемого слоя может быть представлен в виде  $4\pi R^2 \lambda$ . Количество содержащейся в нем энергии равно произведению его на ее объемную плотность. Последняя, как мы знаем, пропорциональна квадрату напряженности поля. Таким образом, в случае кулоновского и био-саваровского поля плотность энергии обратно пропорциональна четвертой степени расстояния, так что энергия, содержащаяся в волновом слое данной толщины  $\lambda$  по мере его расширения (т.е. распространения волны), убывает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Мы видим, следовательно, что в этом случае говорить о переносе волнами определенной энергии невозможно. А потому оказывается нецелесообразным вообще говорить о каких бы то ни было волнах.

Иначе обстоит дело в случае фарадей-максуэловского поля. Здесь плотность энергии оказывается обратно пропорциональной квадрату расстояния, а, следовательно, величина энергии, уносимой раздувающимся волновым слоем, — независимой от его радиуса, т.е. *постоянной*. В этом случае представление о волнах, как о носителях электромагнитной энергии, имеет поэтому непосредственный физический смысл. Заметим, что аналогичным образом обстоит дело в случае *звуковых волн*, где амплитуда колебаний также оказывается обратно пропорциональной первой степени расстояния, а средняя плотность энергии, измеряемая силой или интенсивностью звука, обратно пропорциональной квадрату расстояния. В случае световых волн, т.е. электромагнитных волн определенной длины, силе звука соответствует сила или интенсивность света, измеряемая объемной плотностью энергии электромагнитного поля. На малых (по сравнению с длиной волны) расстояниях, от закона обратной пропорциональности интенсивности квадрату расстояния должны наблюдаться отступления; однако, практически, поскольку принимаются

во внимание лишь большие расстояния, эти отступления не играют роли.

Энергия, уносимая электромагнитными волнами, берется, очевидно, за счет их источника, т.е. за счет механической энергии колеблющегося электрического заряда. Но эту механическую энергию, как мы знаем, можно рассматривать как энергию электромагнитного поля, создаваемого им и его партнером (т.е. неподвижным рядом противоположного знака, притяжением к которому обуславливается колебательное движение первого заряда). С этой точки зрения потенциальная энергия образуемой ими системы (включая собственную энергию каждого из зарядов в отдельности) измеряется электрической энергией кулоновского поля, а кинетическая энергия — магнитной энергией био-саваровского поля. Таким образом, механическую энергию можно рассматривать как электромагнитную энергию, сосредоточенную в непосредственной близости к данному заряду (и его партнеру), т.е. на расстоянии меньшем, нежели длина волны. Что касается всей остальной электромагнитной энергии, находящейся в волновой зоне и непрерывно уносимой волнами во все стороны, то для нее в механике нет аналога. Она пропорциональна квадрату *ускорения* движущегося заряда, а также толщине волновой зоны, т.е. времени, протекшему с начала рассматриваемого движения. Эту энергию называют обычно *лучистой энергией*, а процесс превращения механической энергии (т.е. энергии кулоновского и био-саваровского поля) в лучистую (т.е. в энергию фарадей-максуэловского поля) называют *электромагнитным излучением*. Следует подчеркнуть, что приведенное деление электромагнитной энергии на механическую и лучистую не может быть проведено *точным* образом и поэтому имеет весьма условный смысл, хотя и оказывается весьма удобным на практике. Исторически оно возникло и развилось на почве представления об эфире как о передатчике „лучистых явлений“ (т.е. видимого и невидимого света), при

чем в этой теории лучистая энергия приписывалась эфиру, а механическая—обыкновенной материи.

До сих пор мы ограничивались весьма суммарным описанием фарадей-максуэловского поля, или поля электромагнитных волн, отметив лишь тот факт, что напряженность этого поля прямо пропорциональна ускорению создающего его заряда и обратно пропорциональна первой степени расстояния. В дополнение к этому мы должны теперь указать следующие его особенности.

1) *Поперечный характер*, выражающийся в перпендикулярности электрической напряженности  $\vec{E}$  и магнитной  $\vec{H}$  к направлению „луча“, т.е. прямой  $\vec{R}$ , проведенной от очага поля к данной точке и определяющей направление распространения волн в этой точке. К этому следует прибавить, что  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  зависят не от всего вектора ускорения  $\vec{w}$ , но лишь от *поперечной проекции* его  $\vec{w}_1$ , т.е. от проекции его на плоскость, перпендикулярную к лучу, при чем вектор  $\vec{E}$  направлен в сторону противоположную ускорению.

2) *Напряженности  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$*  численно равны друг другу и взаимно перпендикулярны. При этом они направлены таким образом, что при вращении от  $\vec{E}$  к  $\vec{H}$  (на  $90^\circ$ ) правый винт передвигается в направлении луча.

Если изобразить рассматриваемое поле на некотором расстоянии  $R$  от заряда при помощи силовых линий, то получается следующая картина. Силовые линии образуют сетку, лежащую на поверхности шара с радиусом  $R$ . Если уподобить этот шар земному шару и под осью его подразумевать прямую, проведенную в направлении ускорения  $\vec{w}$  (в эффективный момент  $t' = t - \frac{R}{c}$ ), то электрические силовые

линии образуют меридианы шара, расходящиеся от положительного (северного) полюса и сходящиеся к отрицательному (южному), а магнитные си-

ловые линии—параллельные круги проведенные с запада на восток, т.е. так, чтобы при вращении в этом направлении правый винт перемещался в направлении оси. Наконец, густота силовых линий—как электрических, так и магнитных—достигает максимума у экватора и обращается в нуль у полюсов.

Заметим, что магнитное поле, о котором идет речь и которое мы называли выше „максуэловским“, имеет структуру, совершенно аналогичную био-саваровскому полю—как в смысле формы силовых линий (коаксиальные круги), так и в смысле их густоты на данном расстоянии. При этом роль скорости играет ускорение, а густота убывает с расстоянием обратно пропорционально первой, а не второй степени.

Что касается фарадеевского электрического поля, то оно имеет характер совершенно отличный от кулоновского. Оно действует в сторону противоположную ускорению создающего его заряда на все одноименные заряды, окружающие последний. В случае ускоренно-движущегося электрона, фарадеевское взаимодействие (взаимная индукция) его элементов создает силу торможения, которую мы интерпретируем как силу инерции. Учитывая запаздывание элементарных сил, исходящих от отдельных элементов заряда электрона, нетрудно показать, во-первых, что масса его должна возрастать с увеличением скорости, обращаясь в бесконечность при приближении последней к скорости света (при чем это увеличение массы оказывается пропорциональным кинетической энергии электрона). Далее, это запаздывание приводит к тому, что к силе инерции присоединяется добавочная сила, имеющая характер *трения* (сила лучистого торможения); действием этой силы и обуславливается то уменьшение механической энергии электрона, которым сопровождается его электромагнитное излучение.

Мы видим, таким образом, что электрические силы, которыми обуславливается инерция материи, по существу тождественны с силами, образующими световые волны.

§ 3. *Электромагнитные волны и их источник.* Колебательный или волновой характер световых явлений был установлен задолго до появления электромагнитной теории света в связи с явлениями *интерференции* (и диффракции), которые вместе с тем дали возможность измерить длину световых волн. Последняя, как известно, заключается в пределах примерно от 8 стотысячных долей сантиметра для красного света и до 4 стотысячных — для фиолетового, чему соответствует громадная частота колебаний — порядка нескольких сот миллиардов в секунду.

Теория Максвелла поставила на очередь создание и обнаружение искусственных электромагнитных колебаний гораздо меньшей частоты и соответственно этому гораздо большей длины волны. Эта задача была блестяще решена Герцем в начале 1880-ых годов, а двадцатью годами позже открытые Герцем электромагнитные волны были технически использованы *Маркони* (а отчасти в России *Поповым*) для телеграфирования без проводов (см. *радиотехника*, XXXV, 362 сл.).

Длина электромагнитных волн, применяемых в радиотелеграфии, до последнего времени измерялась сотнями метров или даже километрами. Таким образом, между волнами видимого света и радио-волнами лежала целая пропасть. В настоящее время, однако, эта пропасть почти уничтожена. С одной стороны, длину искусственно создаваемых электромагнитных волн удалось путем уменьшения соответствующих приборов-вibrаторов уменьшить с сотен метров до нескольких сантиметров и даже до десятых долей миллиметра. С другой стороны, чисто оптические исследования были продолжены за пределы красного конца спектра в область инфракрасных лучей (раньше называвшихся тепловыми), при чем удалось практически осуществить „смычку“ этих лучей с электромагнитными. Заметим, что одновременно с необычайным расширением представления о световых волнах в сторону длинных волн было достигнуто не меньшее расширение его в противоположную сторону необычайно коротких волн, путем открытия *рент-*

*геновых лучей* (см.). Последние образуют непрерывную гамму, заканчивающуюся длиной волны примерно около одной миллиардной сантиметра. Волновая природа рентгеновых лучей, их принципиальная тождественность с видимыми лучами, а следовательно и с электромагнитными волнами Герца, была установлена не сразу, а лишь примерно лет через 20 после их открытия, когда Лауэ (в 1913 г.) впервые удалось обнаружить явления интерференции рентгеновых лучей при прохождении их через кристаллы или отражении от последних. Явление интерференции света заключается в периодическом усилении и ослаблении волн одинаковой длины при наложении их друг на друга. Подобные ряды волн образуются при отражении рентгеновых лучей от равноотстоящих плоскостей, образуемых атомами кристалла, при чем усиление их происходит лишь при определенных углах падения (и отражения), при которых волны, отраженные от соседних плоскостей, отличаются друг от друга по фазе на одну или несколько длин волн. Особая пригодность именно кристаллов для наблюдения интерференции рентгеновых лучей обуславливается тем обстоятельством, что расстояние между соседними плоскостями (или атомами) у большинства кристаллов совпадает по порядку величины с длиной волны рентгеновых лучей.

Явление интерференции рентгеновых лучей оказалось мощным орудием экспериментального исследования строения материальных тел—в особенности твердых, и в последнее время получило ряд важнейших применений в технологии и испытаниях материалов.

Спектр „световых“ колебаний (в расширенном смысле слова) простирается в сторону коротких волн еще довольно далеко за пределы рентгеновых лучей. Соответствующие ультра-рентгеновые лучи, испускаемые некоторыми радиоактивными веществами, называются гамма-лучами; лучи еще более короткой волны, в тысячу раз меньшей, чем у крайних рентгеновых лучей, пронизывают все мировое пространство и воспринимаются на земле как „кос-

мическое излучение". Космические лучи вызывают *ионизацию* верхних слоев атмосферы, т.е. вырывание электронов из атомов или молекул воздуха, благодаря чему последний приобретает способность проводить Э. В этом отношении, т.е. в повышении ионизации, а следовательно и электропроводности воздуха, космическим лучам помогают ультрафиолетовые лучи Солнца, действие которых ограничивается, конечно, только обращенной к Солнцу половиной земного шара.

Электропроводность верхних слоев атмосферы имеет чрезвычайно существенное значение для распространения электромагнитных волн, применяемых в радиотехнике, на большие расстояния вдоль земной поверхности. Проводящие слои воздуха отражают эти волны примерно так же, как и земная поверхность; и вместо того, чтобы уноситься в мировое пространство, радио-волны, запертые между поверхностью земного шара и его воздушным чехлом, огибают землю без заметного ослабления. Т. обр., между самыми короткими и самыми длинными электромагнитными волнами существует весьма своеобразная связь: а именно: первые (ультрафиолетовые и космические лучи) способствуют распространению вторых (радио-волн) вдоль земной поверхности. Необходимо отметить, что в положении „наибольшего благоприятствования“ находятся так назыв. „короткие“ радио-волны от 40 и примерно до 8 метров. Более длинные волны проходят через ионизованные слои атмосферы беспрепятственно; более короткие, наоборот, поглощаются в них; и лишь волны, длина которых лежит в указанном интервале, возвращаются обратно к земной поверхности.

Источником электромагнитных волн служит колебательное движение электрических зарядов. В случае радио-волн это колебательное движение осуществляется в форме переменных электрических токов высокой частоты примерно от 1 и до 100 миллионов колебаний в секунду. Возможность подобных колебаний, еще до открытия сопровождающего их „электро-

магнитного излучения“, была установлена теоретически В. Томсоном (лорд Кельвин). Томсон исходил при этом из схемы, изображенной на рис. 19, т.е. конденсатора, обкладки которого соединены друг с другом с наружной стороны проволокой. Последняя для увеличения самоиндукции обычно закручивается в спираль (соленоид), так что предыдущая схема принимает вид, изображенный на рис. 21. Разрядка конденсатора осуществляется, как мы уже видели, в форме электрического тока, который.

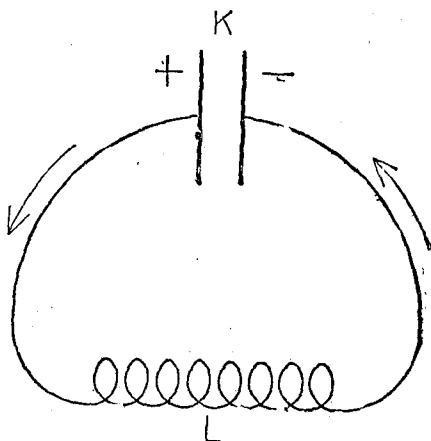


Рис. 21.

однако, не прекращается в тот момент, когда конденсатор совершенно разрядился, но продолжает течь по инерции (т.е. благодаря самоиндукции), перезаряжая конденсатор и в результате постепенно ослабевая до тех пор, пока конденсатор не зарядится до (приблизительно) первоначальной разности потенциалов, но в противоположном смысле. Затем ток начинает течь в обратную сторону до тех пор, пока конденсатор вновь не перезарядится и таким образом вернется в исходное состояние. При этом сила тока достигает максимума в тот момент, когда заряд обкладок конденсатора обращается в нуль.

Происходящие таким образом электрические колебания совершенно аналогичны колебательному движению груза, подвешенного на пружине, если вывести его из равновесия (путем

толчка или изменения длины пружины). Зарядению или перезарядению конденсатора соответствует сжатие или растяжение пружины, а сила тока—скорость движения груза. Колебания груза можно рассматривать как непрерывное превращение его потенциальной энергии в кинетическую и обратно. Точно так же электрические колебания рассматриваемого нами типа можно трактовать как непрерывный переход электрической энергии конденсатора в магнитную энергию тока и обратно. Электрическая энергия (играющая в этом случае роль потенциальной) может быть выражена через заряд одной из обла-

док  $e$  и емкость  $C$  формулой  $U = \frac{e^2}{2C}$ , а магнитная—через силу тока  $i$  и коэффициент самоиндукции  $L$  формулой  $\frac{1}{2} L i^2$ . Приравнивая друг к другу максимальные значения этих энергий  $\frac{e_0^2}{2C}$  и  $\frac{1}{2} L i_0^2$  и принимая во внимание,

что в силу соотношения  $i = \frac{1}{c} \frac{de}{dt}$

$$i_0 = \frac{\omega}{c} e_0 = \frac{2\pi f}{c} e_0 = \frac{2\pi}{\lambda} e_0,$$

гд.  $f$ —частота колебаний, а  $\lambda = \frac{c}{f}$ —длина соответствующих электромагнитных волн (см. ниже), мы получаем следующую формулу (впервые выведенную Томсоном):

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{CL}}$$

или

$$\lambda = 2\pi \sqrt{CL}. \quad (8)$$

В этих формулах емкость и самоиндукция выражены соответственно в электрических и электромагнитных единицах, т. е. в сантиметрах, так что длина волны  $\lambda$  также получается в сантиметрах. Обычно  $C$  и  $L$  имеют тот же порядок величины, как и линейные размеры проводника (поскольку форма последнего не выбрана нарочитым образом, чтобы по возможности увеличить значения  $C$  и  $L$ ). При таких условиях длина электромагнитных волн, излучаемых проводником при наличии электриче-

ских колебаний, должна быть также близка к его линейным размерам.

Колебание груза, подвешенного на пружине, является прототипом колебательного движения, которое способны совершать все решительно упругие тела—струны, стержни, пластинки и т. д., вообще тела любой формы и размеров. В этом случае роли пружины и груза оказываются совмещенными в одном и том же теле (им может быть, в частности, пружина, лишенная дополнительного груза, помимо своей собственной массы).

Аналогичным образом электрические колебания описанного выше типа могут происходить в любом металлическом теле, без дополнительной самоиндукции в виде соленоида и дополнительной емкости в виде конденсатора, каковы бы ни были его размеры и форма. При этом, так же как и в случае упругих колебаний, частота их оказывается тем больше, чем меньше линейные размеры тела. Необходимо отметить, что в обоих случаях могут иметь место колебания различных частот. В простейшем случае струны или длинного провода эти частоты находятся друг к другу в отношении ряда целых чисел 1:2:3 и т. д., образуя основной тон, или основное колебание (самое медленное), и верхние дополнительные колебания (или обертоны).

Таким образом, всякое металлическое тело способно совершать, на ряду с упругими колебаниями, воспринимаемыми в форме звука, электрические колебания, не воспринимаемые непосредственно, но являющиеся по существу не чем иным, как невидимым светом чрезвычайно большой длины волны. Длина электромагнитных волн, испускаемых подобным „святыщимся“, т. е. электрически вибрирующим телом, приблизительно совпадает с длиной звуковых волн, соответствующих упругим колебаниям этого тела, и в случае основного колебания сравнима с его линейными размерами. Так, напр., основному колебанию металлического провода, как упругому (звуковому), так и электрическому (световому), соответствует длина волны (звуковой или электро-

магнитной), ровно вдвое большая его собственной длины. Это соотношение объясняется тем, что в обоих случаях концы провода являются „узловыми“ точками (в которых амплитуда колебаний равна нулю) и что расстояние между двумя соседними узлами равняется половине длины волны.

При данной длине волны  $\lambda$  частота колебаний, т.е. число колебаний в секунду  $f$ , тем больше, чем больше скорость их распространения; последняя может быть определена как произведение  $f$  на  $\lambda$ . Принимая во внимание, что скорость звука (т.е. скорость распространения упругих колебаний) измеряется несколькими сотнями метров или максимум несколькими километрами в секунду, тогда как скорость света (электромагнитных волн) равна 300.000 км в секунду, мы приходим к заключению, что у одного и того же (металлического) тела частота электрических (световых) колебаний должна быть примерно в 100 тысяч раз больше, чем частота колебаний звуковых. Так, напр., в случае проволоки в 1 метр длиной мы должны получить, при длине волны в 2 метра, звуковые колебания с частотой порядка 1.000 и „световые“ колебания с частотой порядка 100 миллионов в секунду.

„Звучание“ упругого тела может быть вызвано простым толчком или ударом. При этом колебательное движение тела быстро замирает или, как говорится, „затухает“, отчасти вследствие „излучения“ его энергии в виде звуковых волн, распространяющихся в окружающем воздухе, отчасти же вследствие превращения этой энергии в теплоту (нагревание). Аналогичным образом невидимое „свечение“ металлического тела может быть вызвано особым „электрическим толчком“, при чем колебательное движение, образующее сущность этого свечения, чрезвычайно быстро затухает, частью благодаря излучению энергии в окружающее пространство („эфир“) в виде электромагнитных волн, частью же вследствие превращения ее в тепловую энергию (тепловое действие тока, джаулево тепло).

Электрический толчок, о котором

идет речь, может быть вызван множеством различных способов, напр. введением рассматриваемого тела в разрядную цепь индукционной катушки. Именно таким способом пользовался Герц; аналогичным образом действовал и Маркони. Впоследствии, однако, в радиотехнике от затухающих электрических колебаний перешли к колебаниям незатухающим, которые возбуждаются не отдельными толчками, а непрерывным воздействием, аналогичным действием смычка на струну. В качестве подобного возбудителя или генератора незатухающих электрических колебаний вначале служила электрическая дуга; в последнее время выработалась новая универсальная форма „электрического смычка“ в виде так назыв. триода, или катодной лампы с тремя электродами (см. *электронная лампа*). Пользуясь подобным электрическим смычком, можно „играть“ на любом металлическом теле неслышимые и невидимые световые симфонии.

В радиотехнике источниками „света“, т.е. невидимых электромагнитных волн, служат передатчики или передаточные антенны, достигающие иногда (в случае очень длинных волн) гигантских размеров. Источниками видимого света (а также примыкающих к нему инфракрасных и ультрафиолетовых лучей), т.е. электромагнитных волн с длиной порядка нескольких сотых долей сантиметра, служат отдельные атомы и молекулы материальных тел. Эти миниатюрные радио-антенны имеют чрезвычайно маленькие размеры—примерно в 10 тысяч раз меньше, чем длина испускаемых ими волн. При этом под размерами их понимаются размеры тех орбит, по которым движутся находящиеся в них электроны. Эти размеры могут быть приблизительно определены из расстояний между соседними атомами в твердых телах; в случае наружных электронов они близки к  $10^{-8}$ , т.е. одной стомиллионной сантиметра.

Заметим, что наличие в мельчайших частицах нейтральной материи—атомах—еще более мелких *наэлектризованных* частиц непосредственно яв-



ствуется из самого факта *видимости* материальных тел, ибо эта видимость обозначает не что иное, как испускание электромагнитных волн, источником которых могут быть лишь колеблющиеся наэлектризованные частицы. Природа этих частиц может быть установлена более точным образом путем изучения того изменения в характере испускаемого света, которое вызывается действием внешнего магнитного поля. Это изменение, которое искал еще Фарадей, было обнаружено в 1900 г. Земаном. В простейших случаях оно заключается в расщеплении каждой спектральной линии на три компоненты, из коих центральная совпадает с исходной линией, а боковые смещены в противоположные стороны на расстояния, пропорциональные напряженности поля (см. *земаново явление и энергия*). Теория этого явления Земана была дана Лоренцом. По существу она совпадает с изложенной в предыдущей главе ланжевеновской теорией диамагнетизма. Действие магнитного поля на колеблющийся или обращающийся вокруг центра атома электрон сводится, как мы видели, к *прецессии* его орбиты, т. е. к сравнительно медленному вращению ее вокруг направления магнитного поля. При этом гармоническое колебательное движение, параллельное полю, не испытывает изменения, т. е. сохраняет свою нормальную частоту  $f$ , тогда как прямолинейное гармоническое колебание в направлении, перпендикулярном к полю благодаря прецессии, перестает быть гармоническим и может быть представлено в виде геометрической суммы двух вращений одинаковой амплитуды и противоположного направления с частотами  $f + f_1$  и  $f - f_1$ , где  $f$  — частота невозмущенного колебания, а  $f_1$  — частота прецессии, пропорциональная интенсивности магнитного поля. Это изменение в характере колебательного движения отражается на характере испускаемого света в виде расщепления исходной неполяризованной спектральной линии на три поляризованные компоненты — одну прямолинейно поляризованную с неизменной частотой и две

поляризованные по кругу в противоположные стороны с частотами  $f + f_1$  и  $f - f_1$  (см. *поляризация света и энергия*). По направлению поляризации смещенных компонент, а также по величине их смещения  $f_1$  можно определить, во-первых, *знак* электрического заряда колеблющейся частицы и, во-вторых, отношение этого заряда к массе. Таким путем оказалась возможность отождествить внутриатомные частицы, колебаниями которых обусловлен испускаемый атомами свет, с электронами, наблюдавшимися ранее в свободном состоянии в виде катодных лучей.

При падении на атомы какого-либо тела свободные электроны, образующие катодные лучи, вызывают колебательное движение связанных внутриатомных электронов, вызывая таким образом свечение атомов. Сравнительно медленные катодные лучи, с энергией, соответствующей ускоряющей разности потенциала в несколько вольт, приводят при этом в колебание наименее прочно связанные внешние электроны, от которых зависит видимый, а также отчасти инфракрасный и ультрафиолетовый свет. Более быстрые катодные лучи с энергией порядка нескольких тысяч или десятков тысяч вольт приводят в колебание более прочно связанные внутренние электроны, которыми обуславливается испускание *рентгеновых* лучей.

Необходимо отметить, что и при отсутствии внешнего воздействия находящиеся в атоме электроны не покоятся, но быстро обращаются вокруг положительных ядер. Однако, это нормальное движение, вопреки развитым выше представлениям, столь хорошо применимым к электрическим колебаниям в обыкновенных проводниках, не сопровождается излучением. Связанные с этим затруднения привели к созданию теории квантов (см. *энергия*).

§ 4. *Вынужденные электрические колебания и вторичные электромагнитные волны; распространение световых волн в материальных телах.* В предыдущем параграфе мы рассматривали электромагнитные волны как следствие электрических колебаний, т. е. колебательного движения электро-

нов. Последние могут быть, однако, не только причиной, но и *следствием* первых. Если какое-нибудь тело находится в поле электромагнитных волн, исходящих от внешнего источника, то образующие эти волны колеблющиеся электрические (и магнитные) силы вызывают *вынужденные* колебания электронов в этом теле. Эти вынужденные электрические колебания происходят синхронно с вызывающими их силовыми колебаниями, т. е. имеют *одинаковую с ними частоту*. Будучи следствием „первичных“ силовых (электромагнитных) колебаний, они являются в свою очередь причиной или источником „вторичных“ силовых колебаний, т. е. вторичных электромагнитных волн той же самой длины.

Рассеянный и отраженный свет, благодаря которому мы видим окружающие нас несамосветящиеся тела, является примером вторичных электромагнитных волн, испускаемых по вышеописанному механизму. При падении на тело монохроматического света, т. е. света, образованного синусоидальными волнами, тело представляется окрашенным в тот же самый цвет, как и источник света, что соответствует совпадению длины первичных и вторичных волн. Таким образом, в этом случае различные тела отличаются друг от друга лишь яркостью своего вторичного свечения, т. е. интенсивностью рассеянного или отраженного света по отношению к падающему. Эта относительная интенсивность тем больше, чем больше амплитуда электронных колебаний, вызываемых первичными силовыми колебаниями данной амплитуды. В том случае, когда электроны способны совершать свободные колебания определенной частоты  $f_0$ , амплитуда их вынужденных колебаний оказывается тем большей, чем ближе частота  $f$  вынуждающих колебаний к  $f_0$ . Если пренебречь силами трения, то амплитуда вынужденных колебаний изменяется обратно пропорционально разности  $f^2 - f_0^2$ , обращаясь в бесконечность при  $f = f_0$ . На самом деле благодаря силам трения она при этом остается конечной, достигая более или менее резко выраженного максимума.

Это явление, хорошо известное в акустике, называется *резонансом*. Разнообразная окраска, которую принимают разные тела при освещении одним и тем же белым светом, объясняется неодинаковой интенсивностью отражения различных монохроматических составляющих этого света.

В особенно отчетливой форме явление оптического резонанса наблюдается в случае газов: при пропускании через какой-нибудь холодный (т. е. не самосветящийся) газ смешанного (белого) света поглощаются лишь те лучи, которые могут испускаться этим газом в раскаленном состоянии или под влиянием электрического разряда (т. е. электронных ударов). Другими словами, „спектр поглощения“ газа совпадает с его спектром испускания.

В области длинных электромагнитных волн, применяемых в радиотехнике, мы имеем дело с явлением вторичных или *вынужденных* электрических колебаний при *приеме* радиоволн. Для улучшения приема, т. е. максимального увеличения интенсивности вынужденных колебаний, применяется принцип резонанса. Последний достигается путем настройки приемной системы, т. е. приближения частоты  $f_0$  ее свободных колебаний к частоте  $f$  первичных силовых колебаний, которые в этом случае воспринимаются в виде некоторой внешней электродвижущей силы.

Эффективное сопротивление колебательного контура, т. е. отношение амплитуды тока  $i_0$  к амплитуде э. д. силы  $f_0$  выражается при наличии самоиндукции  $L$  и емкости  $C$  формулой

$$R' = \sqrt{R^2 + \left(\frac{\omega}{c}L - \frac{c}{\omega C}\right)^2}, \quad (9)$$

которая при  $C = 0$  переходит в формулу (33) предыдущей главы. Эта формула показывает, что э. д. сила самоиндукции и разность потенциалов на обкладках конденсатора действуют в противоположных направлениях, ослабляя друг друга. При условии  $\frac{\omega}{c}L = \frac{c}{\omega C}$  они взаимно компенсируются, что соответствует минимальному значению эффективного сопротивления  $R' = R$ , т. е. максимальной силе тока. Это условие,

как показывает формула (7), в связи с  $\omega = 2\pi f$  представляет собой условие резонанса,

При рассеянии монохроматического света обычно наблюдается частичное изменение частоты колебаний. Другими словами, в спектре рассеянного света, на ряду с „линией“, характеризующей первичные лучи, наблюдаются сравнительно очень слабые линии, которым соответствует несколько отличная частота колебаний.

Это явление, предвиденное еще Ралеем в начале нашего века, было впервые экспериментально открыто в 1928 г. почти одновременно Раманом в Калькутте и у нас в СССР Л. И. Мандельштамом и Г. С. Ландсбергом (см. *раманово явление и энергия*). В радиотехнике ему соответствует широко известное явление *модуляции* (незатухающих) электрических колебаний, т. е. периодическое изменение их интенсивности. Представим себе, напр., что на передаточной станции создаются колебания с частотой  $f = 1$  миллион, амплитуда которых периодически усиливается и ослабляется,  $f_1 = 1000$  раз в секунду, под действием, напр., телефонной мембраны, колеблемой соответствующим звуком. Это колебание переменной амплитуды можно рассматривать как сумму двух колебаний с постоянными амплитудами, но с различными частотами, равными  $f + f_1$  и  $f - f_1$ <sup>1)</sup>. Соответственно этому испускаемые станцией электромагнитные волны можно рассматривать как результат наложения двух систем волн, с частотами  $f + f_1$  и  $f - f_1$ . Если приемную станцию настроить на одну из них, то при наличии очень острого резонанса другая система не будет вовсе восприниматься.

В случае электромагнитных волн, рассеиваемых двухатомными или более сложными молекулами (а также кристаллами), которые мы будем при этом рассматривать не как радио-приемники, но как радио-передатчики (радио-приемником служит при этом спектральный аппарат), происходит совер-

шенно аналогичное явление модуляции, обусловленное вращательным и колебательным движением молекул (так как амплитуда электронных колебаний зависит от расстояния между атомами и вообще от их относительного положения). Т. обр., в спектре рассеянного света наряду с неизменными лучами должны наблюдаться лучи, частота которых отличается от частоты первичных лучей на частоту свободного колебательного движения атомов в молекуле или на число ее оборотов (в секунду) вокруг собственной оси. Эти результаты, а равно и все вытекающие из них следствия относительно интенсивности рассеянных лучей находятся в полном согласии с опытом.

Возвращаясь к радио-волнам, мы должны отметить, что при приеме их непосредственно наблюдается не основная передающая частота  $f$ , но только лишь частота модуляции  $f_1$ , которая обычно лежит в акустической области и может быть слышима в телефон. Это устранение передающей частоты осуществляется путем так назыв. *выпрямления* электрических колебаний в приемном аппарате. Выпрямление осуществляется тем, что через цепь приемника электрический ток может проходить в одну лишь сторону, тогда как при противоположном направлении электродвижущей силы тока не получается. Таким образом, выпрямитель представляет собой своего рода электрический клапан, или „вентиль“, напоминающий по своему действию клапан обыкновенного воздушного или водяного насоса; при одном направлении струи воздуха (или воды) этот клапан остается открытым, а при противоположном он захлопывается. Простейшими выпрямителями в радиотехнике являются кристаллические детекторы хорошо известные каждому радиолюбителю. Более совершенными и тонкими выпрямителями являются те же катодные лампы (триоды), которыми пользуются и для генерации электрических колебаний.

Если в телефоне радиоприемника одновременно возбуждаются два электрических колебания с весьма высо-

<sup>1)</sup> Действительно, согласно известной тригонометрической формуле,  $\sin 2\pi f_1 t \sin 2\pi f t = \frac{1}{2} [\cos 2\pi (f - f_1) t - \cos 2\pi (f + f_1) t]$ .

ними, но сравнительно близкими частотами  $f_1$  и  $f_2$ , то, складываясь друг с другом, или, как говорится, *интерферируя*, они попеременно то усиливают, то ослабляют друг друга. Число подобных усилений или ослаблений — или так называемых биений — равно разности обеих частот  $f_1 - f_2$ . Если эта разность лежит в акустической области, т.е. составляет несколько сотен или тысяч в секунду, то биения непосредственно воспринимаются слухом, как „разностный“ тон соответствующей высоты, между тем как оба интерферирующих колебания, образующих этот тон, остаются совершенно незаметными. Само собой разумеется, что для обнаружения их биений они должны быть выпрямлены.

На этом принципе (впервые использованном английским физиком Виддингтоном для измерения очень малых изменений емкости) основан построенный Л. С. Терменом „радиофон“ („терменовок“) — музыкальный прибор, на котором можно „играть“ путем простого движения руки, без непосредственного соприкосновения с ним. Прибор состоит из двух колебательных контуров, при чем частота колебаний одного из них ( $f_1$ ) остается постоянной, а другого ( $f_2$ ) меняется при приближении или удалении руки от стержня, связанного с его емкостью (конденсатором). Таким образом, движением руки мы меняем, и притом чрезвычайно быстро, частоту разностного тона  $f_1 - f_2$ , издаваемого мембраной телефона, на который действуют оба колебания. (см. *электрические муз. инструм.*, III, 8 и рис. 1).

Описанный выше эффект Рамана можно, если угодно, рассматривать как аналог подобного рода биений в оптической области, т.е. в области видимого света. Здесь основными колебаниями являются быстрые первичные колебания ( $f$ ) и медленные колебания, образующие модуляцию ( $f_1$ ). При этом, однако, наряду с разностным „тоном“  $f - f_1$ , наблюдается и суммовый с частотой  $f + f_1$ .

Мы должны теперь вкратце рассмотреть вопрос о распространении электромагнитных и в частности световых волн в материальных телах. Это рас-

пространение представляет собой сложный процесс, заключающийся в непрерывном возбуждении первичными электромагнитными колебаниями вторичных и слиянии последних с первыми при дальнейшем совместном их распространении в теле. Если бы содержащиеся в теле электроны были связаны абсолютно прочно, т.е. не могли приводиться в колебание первичными волнами, то последние распространялись бы совершенно таким же образом, как если бы тела вовсе не было, т.е. как в пустоте. Изменение характера их распространения в материальной среде по сравнению с пустотой обуславливается именно тем обстоятельством, что раскачивая электроны, содержащиеся в теле, электромагнитные волны, вызывающие эти колебания, непрерывно видоизменяются путем слияния с волнами, вызываемыми последними.

В том случае, когда колебательное движение электронов происходит гармонически (синусоидально) и притом *без трения*, результатом всего процесса является кажущееся изменение — обычно уменьшение — длины волны, тем большее, чем больше подвижность электронов, т.е. чем больше диэлектрическая постоянная среды  $\epsilon_f$  для колебаний данной частоты  $f$ . Отношение истинной длины волны  $\lambda_0 = \frac{c}{f}$  („в пустоте“) к кажущейся  $\lambda$  равно, как показал впервые Максвелл, квадратному корню из этой диэлектрической постоянной. Если, как это делается обычно, определить произведение  $\lambda f = v$  как скорость распространения волн в данной среде, то соотношение между длинами волн можно заменить соотношением между скоростями в пустоте и в среде и положить

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_f}. \quad (10)$$

С другой стороны, как известно из элементарной теории преломления волн на поверхности двух различных сред, отношение  $\frac{c}{v}$  должно равняться отношению синуса угла падения к синусу угла преломления, т.е. показателю преломления данной среды по

отношению к пустоте. Таким образом, согласно электромагнитной теории Максвелла, показатель преломления какого-либо тела оказывается равным квадратному корню из его диэлектрической постоянной для колебаний рассматриваемой частоты. Последняя оговорка при первоначальных проверках теории Максвелла не принималась во внимание, так что показатель преломления для света с данной частотой колебаний сравнивался с диэлектрической постоянной тела в *постоянном* электрическом поле. Этим обстоятельством объясняются те кажущиеся отступления от соотношения Максвелла, которые были найдены первыми исследователями. При учете зависимости диэлектрической постоянной от частоты колебаний  $f$  (так называемой „дисперсии“) соотношение Максвелла выполняется совершенно точно.

Необходимо подчеркнуть, что обычное представление о скорости  $v = \lambda f$ , как об *истинной* скорости электромагнитных волн в данной среде, в корне неправильно. Истинная скорость электромагнитных волн в любой материальной среде та же самая, что и в пустоте; величина же  $v$  представляет собой кажущуюся скорость, и, строго говоря, имеет смысл только для гармонических колебаний.

Наличие сил трения, тормозящих колебательное движение электронов, проявляется в том, что результирующая волна, получающаяся от слияния волн, вызывающих это движение и им вызываемых, испытывают при распространении в теле постепенное уменьшение интенсивности или, как говорится, *поглощение* (помимо этого, силы сказываются также на величине кажущейся длины волны, а следовательно и кажущейся скорости распространения).

Аналогичным образом объясняются разные другие эффекты, наблюдающиеся при распространении электромагнитных волн в материальной среде, как, напр., открытое еще Фарадеем явление вращения плоскости поляризации световых лучей, т.е. направления колебаний при распространении их в продольном магнитном поле. Обусловливаемая последним прецес-

сия сказывается в том, что под влиянием электрических сил, колеблющихся в одной плоскости, электроны совершают вынужденные колебания в несколько отличной плоскости, в результате чего плоскость колебаний постепенно поворачивается вокруг магнитных силовых линий.

§ 5. *Математическая формулировка электромагнитной теории Максвелла-Лоренца.* Результаты, изложенные в последних двух главах, могут быть сформулированы в виде системы дифференциальных уравнений электромагнитного поля, представляющих собой обобщение и дальнейшее развитие уравнений электрического поля, рассмотренных в конце 1 главы.

При выводе этих уравнений, впервые установленных Максвеллом и приведенных к окончательному виду Лоренцем, мы будем исходить из уравнений § 1 настоящей главы, определяющих „магнитодвижущую силу“  $V'$  электрического тока проводимости и смещения:

$$V' = 4\pi i + \frac{1}{c} \frac{d\Psi}{dt} \quad (I)$$

и электродвижущую силу индукции

$$V = - \frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} \quad (II)$$

Заметим, прежде всего, что величины  $i$ ,  $\Psi$  и  $\Phi$  в правых частях этих уравнений представляют собой потоки (электрического заряда, электрического поля и магнитного поля), проходящие через какую-либо поверхность  $S$ , ограниченную тем замкнутым контуром  $c$ , для которого вычисляется магнито- или электродвижущая сила. Потоки, не охватываемые этим контуром, не влияют на величину  $V$  или  $V'$  и могут поэтому не приниматься во внимание.

Обозначая вектор нормали к поверхности  $S$  (форма которой остается произвольной) через  $\vec{n}$ , мы можем представить потоки  $i$ ,  $\Psi$ ,  $\Phi$  в виде  $i = \int j_n dS$ ,  $\Psi = \int E_n dS$  и  $\Phi = \int H_n dS$ , где  $j_n$ ,  $E_n$ ,  $H_n$  — проекции плотности электрического тока, электрической напряженности и магнитной напряженности на нормаль  $\vec{n}$ . Величины  $V$

и  $V'$  могут быть представлены аналогичным образом в виде интегралов

$$V' = \oint H_{\tau} d\sigma \text{ и } V = \oint E_{\tau} d\sigma,$$

взятых вдоль замкнутого контура  $\sigma$ ; здесь  $\vec{\tau}$  представляет собой вектор, направленный по касательной к  $\sigma$  в ту сторону, куда нужно вращать правый винт для того, чтобы он перемещался в направлении нормали  $\vec{n}$ .

Согласно теореме Стокса, предыдущие интегралы могут быть преобразованы в поверхностные интегралы вида

$$V' = \int (\text{rot } \vec{H})_n dS \text{ и } V = \int (\text{rot } \vec{E})_n dS,$$

т.е. в потоки через поверхность  $S$  векторов  $\text{rot } \vec{H}$  и  $\text{rot } \vec{E}$ . Напомним, что вектор  $\text{rot } \vec{A}$  определяется через свои прямоугольные слагающие формулами [гл. I, ф. (32)]:

$$(\text{rot } \vec{A})_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}, \quad (\text{rot } \vec{A})_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}, \quad (\text{rot } \vec{A})_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}.$$

При этом в качестве поверхности  $S$  можно выбрать ту же самую поверхность, как и при определении потоков  $i$ ,  $\Psi$ ,  $\Phi$ .

Таким образом, равенства I и II могут быть переписаны в следующем виде:

$$\int (\text{rot } \vec{H})_n dS = \int \left( 4\pi \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)_n dS$$

$$\int (\text{rot } \vec{E})_n dS = - \int \frac{1}{c} \left( \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \right)_n dS.$$

В виду произвольности поверхности  $S$  из этих равенств вытекают дифференциальные уравнения:

$$\text{rot } \vec{H} = 4\pi \vec{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (10)$$

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \quad (11)$$

которые в проекциях на координатные оси принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \frac{1}{c} \frac{\partial E_x}{\partial t} &= 4\pi j_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{1}{c} \frac{\partial E_y}{\partial t} &= 4\pi j_y \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \frac{1}{c} \frac{\partial E_z}{\partial t} &= 4\pi j_z \end{aligned} \right\} (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial H_x}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} + \frac{1}{c} \frac{\partial H_y}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} + \frac{1}{c} \frac{\partial H_z}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \right\} (13)$$

Заметим, что эти уравнения могут быть получены непосредственно из равенств I и II путем надлежащего выбора контура  $\sigma$  и поверхности  $S$ . А именно, в качестве  $\sigma$  нужно было бы выбрать бесконечно малый прямоугольный контур со сторонами, параллельными двум из координатных осей и, следовательно, с площадью  $S$ , перпендикулярной к третьей оси.

Заметим, что уравнение (11) представляет собой обобщение уравнения электростатики  $\text{rot } \vec{E} = 0$ , в которое оно превращается в случае поля, не зависящего от времени.

$$\text{Другое уравнение электростатики} \\ \text{div } \vec{E} = 4\pi\rho \quad (14)$$

(ср. I главу, § 8), не содержащее времени, остается в силе и в общем случае. К этому уравнению мы можем присоединить аналогичное уравнение для магнитного поля

$$\text{div } \vec{H} = 0. \quad (15)$$

Замена плотности  $\rho$  нулем соответствует отсутствию магнитных полюсов, которые являлись бы началом или концом магнитных силовых линий.

В проекциях на координатные оси предыдущие уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 4\pi\rho \quad (16)$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0. \quad (17)$$

Эти уравнения совместно с (12) и (13) составляют полную систему уравнений Максвелла-Лоренца.

Заметим, что из (12) и (16) вытекает следующее соотношение между плотностью заряда и тока:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \vec{j} = 0, \quad (18)$$

выражающее принцип сохранения электрического заряда. В самом деле, умножая это уравнение на  $dv$  и интегрируя по какому-либо объему  $v$ ,

мы получаем с помощью формулы Гаусса

$$-\frac{\partial}{\partial t} \int \rho dv = \oint c j_n dS.$$

Здесь левая часть представляет собой уменьшение электрического заряда, содержащегося внутри поверхности  $S$  за единицу времени, а правая — поток электрического заряда, вытекающий за то же время через  $S$ .

Помимо соотношения (18), величины  $\rho$  и  $\vec{j}$  остаются совершенно произвольными и служат исходными данными при определении поля путем интегрирования уравнений Максвелла-Лоренца.

Это интегрирование облегчается введением так называемых „потенциалов“ — скалярного  $V$  и векторного  $\vec{A}$ , по формулам

$$\vec{E} = -\text{grad } V - \frac{1}{c} \frac{d\vec{A}}{dt}, \quad \vec{H} = \text{rot } \vec{A}. \quad (19)$$

Подставляя эти выражения в уравнения (11) и (15), нетрудно проверить, что они удовлетворяются тождественно (чем и оправдывается введение потенциалов), между тем, как уравнения (10) и (14) обращаются в дифференциальные уравнения второго порядка для потенциалов  $V$  и  $\vec{A}$ :

$$\nabla^2 V - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -4\pi\rho \quad (20)$$

$$\nabla^2 \vec{A} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = -4\pi\vec{j} \quad (21)$$

при дополнительном условии

$$\frac{1}{c} \frac{\partial V}{\partial t} + \text{div} \vec{A} = 0, \quad (22)$$

которое выполняется в связи с соотношением (18).

Уравнение (20) представляет собой обобщение уравнения Пуассона (33) гл. I и называется уравнением *Даламбера*.

При  $\rho = 0$  оно принимает вид обыкновенного *волнового уравнения*, т.е. уравнения распространения колебаний в упругой однородной среде, при чем коэффициент  $c$  обозначает скорость этого распространения.

Общие решения уравнений (20) и

(21) выражаются следующими формулами:

$$V(\vec{r}, t) = \int \frac{\rho(\vec{r}', t') dv'}{R} \quad (23)$$

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \int \vec{j} \frac{(\vec{r}', t') dv'}{R}, \quad (24)$$

где  $t' = t - \frac{R}{c}$ , а  $R$  — расстояние между

точкой (с радиусом-вектором  $\vec{r}$ ), для которой определяется потенциал, и элементом объема  $dv$  (с радиусом-вектором  $\vec{r}'$ ), к которому относится плотность заряда или тока  $\rho, \vec{j}$ . Таким образом, плотности эти берутся не для того момента, для которого определяется потенциал, а для предшествующего момента в соответствии с конечной скоростью распространения электромагнитных действий.

Формулы (23) и (24) можно рассматривать как общее математическое выражение этого запаздывания. Заметим, что определяемые им потенциалы также называются „запаздывающими“, или „отстающими“.

В применении к случаю электрического заряда  $e$  весьма малых размеров (в пределе точечного), движущегося со скоростью  $\vec{v}$  (которая может произвольным образом изменяться с временем) формулы (23) и (24) дают

$$V = \frac{e}{R'(1 - \frac{v'k'}{c})}, \quad \vec{A} = V \frac{v'}{c}, \quad (25)$$

где штрихи означают, что соответствующие величины — расстояние  $R$ , скорость  $\vec{v}$ , и проекция ее на  $\vec{R}$  — берутся не для момента  $t$ , для которого определяются потенциалы, но для предшествующего момента  $t' = t - \frac{R'}{c}$ . Заметим, что формулы (25) были впервые даны Льенаром и Вихертом.

Из этих формул с помощью (19) можно вывести выражения для напряженностей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . Они оказываются довольно сложными и сводятся к уже рассмотренным нами выше кулоновскому — фарадеевскому полю в случае  $\vec{E}$  и био-

саваровскому - максуэловскому в случае  $\vec{H}$ .

Связь между слагающими электромагнитного поля и величинами  $\vec{i}, \rho$  (которые характеризуют расположение и движение зарядов, т.е. материю), устанавливаемая уравнениями Максвелла-Лоренца, может быть интерпретирована двояким образом.

В первой интерпретации материя рассматривается как первичный фактор, или „причина“, а электромагнитное поле—как вторичный фактор, или „следствие“. Математически это означает, что величины  $\vec{j}$  и  $\rho$  считаются данными (известными), а величины  $\vec{E}, \vec{H}$ —подлежащими определению. Во второй интерпретации, наоборот, поле считается первичным фактором, а материя вторичным—местом сгущения силовых линий поля.

Развитие электронной теории привело к утверждению первой интерпретации (в обновленной форме, см. выше). При этом уравнения электромагнитного поля дополняются уравнениями механики электронов, определяющими движение электрона в заданном „внешнем“ электрическом поле. При таких условиях э.-м. поле может рассматриваться как посредник в процессе взаимодействия электронов, принципиально несущественный для характеристики этого взаимодействия и связанного с ним движения.

Однако, не исключена возможность того, что вторая интерпретация окажется в дальнейшем если не практически, то принципиально более правильной. Возможность эта связана с электромагнитной интерпретацией массы, т.е. сведением ее к энергии электромагнитного поля, создаваемого соответствующей частицей. При таких условиях уравнения движения электрона могут быть выведены из дополнительного принципа, относящегося к электромагнитному полю и не содержащегося в уравнениях Максвелла-Лоренца (последние с точки зрения второй интерпретации служат лишь для определения величин  $\rho$  и  $\vec{j}$ , характеризующих состояние материи).

Этим дополнительным принципом является принцип сохранения электромагнитной энергии и связанный с ним принцип сохранения электромагнитного количества движения.

Понятие электромагнитной энергии как величины, распределенной в электромагнитном поле, получается, исходя из рассмотрения работы электромагнитных сил. Если не разделять электромагнитное поле, связанное с движением электрона, на „внешнее“ (происходящее от других электронов) и собственное, то работа сил, действующих в объеме  $V$  за единицу времени может быть определена интегралом  $A = \int \vec{E} \cdot c \vec{j} dV$ , где  $\vec{E} \cdot \vec{j}$  обозначает скалярное произведение векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{j}$  (напомним, что магнитные силы, будучи перпендикулярны к направлению движения, не совершают работы).

Если в произведении  $\vec{E} \cdot c \vec{j}$  заменить вектор  $\vec{j}$  его выражением через  $\vec{H}$ , то после простых преобразований интеграл, определяющий работу, приводится к виду

$$A = -\frac{d}{dt} \int \xi dV - \oint K_n dS, \quad (27)$$

где

$$\xi = \frac{E^2 + H^2}{8\pi}, \text{ а } K = \frac{c}{4\pi} [\vec{E} \cdot \vec{H}]. \quad (26)$$

$S$  обозначает замкнутую поверхность, ограничивающую  $V$ ;  $[\vec{E} \cdot \vec{H}]$  есть так назыв. внешнее или векторное произведение векторов  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , т.е. вектор, перпендикулярный к ним обоим и равный площади параллелограмма, на них построенного.

Отбрасывая второй интеграл в (26) мы, естественно, должны интерпретировать интеграл  $\int \xi dV$  как энергию, заключенную в объеме  $V$ —так как за счет этой величины получается работа, производимая действующими в  $V$  силами. Полагая  $A = 0$  и принимая во внимание второй член в правой части, мы оказываемся вынужденными рассматривать его как поток энергии, вытекающей в единицу времени через поверхность  $S$ . Введением этого потока



обеспечивается справедливость принципа сохранения энергии при  $A=0$ . Если в объеме  $V$  содержится электрон, то равенство  $A=0$  возможно лишь при том условии, что силы, действующие на электрон извне, уравниваются силами взаимодействия его собственных элементов. Но, как мы видим выше, именно к этому условию и сводится электромагнитная теория массы.

Преобразуя поверхностный интеграл  $\oint K n dS$  по формуле Гаусса в объемный  $\int \text{div} \vec{K} dV$  и полагая  $A=0$ , мы можем выразить принцип сохранения энергии в виде дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \text{div} \vec{K} = 0, \quad (28)$$

аналогичного уравнению (18), выражающему закон сохранения Э.

Необходимо, однако, отметить, что уравнение (28) не может быть применено к отдельным точкам электрона, так как силы, действующие на отдельные элементы его, отнюдь не находятся в равновесии, которое может осуществляться лишь в среднем для всего электрона.

Если в предыдущих рассуждениях вместо работы сил ввести в рассмотрение *импульс* их за единицу времени, т.е. самые силы, то вместо уравнения энергии (26) получается уравнение того же вида, где скаляр  $\xi$  в объемном интеграле заменен вектором  $\vec{g} = \frac{1}{c^2} \vec{K}$ ,

а вектор  $\vec{K}$  в поверхностном интеграле — тензором напряжений  ${}^2T$  (с обратным знаком), который уже был введен нами в конце I главы. Соответственно этому вектор  $\vec{g}$  может быть интерпретирован как *объемная плотность электромагнитного количества движения*, а тензор —  ${}^2T$  — как плотность потока количества движения.

В механике количество движения определяется как произведение массы на скорость. Аналогичным образом вектор  $\vec{g}$  можно рассматривать как произведение плотности массы электромагнитного поля на скорость его распространения. Точно так же вектор

$\vec{K}$  (поток энергии, вектор Пойнтинга) можно определить как произведение последней на плотность энергии. Т.обр., оказывается, что с энергией электромагнитного поля неразрывно связана его *масса*, равная энергии, деленной на квадрат скорости света.

В заключение нам остается сказать несколько слов об уравнениях электромагнитного поля в материальных телах (средах). Здесь вместо истинного поля рассматривают *усредненное* или *сглаженное* поле, соответствующее представлению о теле не как о системе дискретных частиц, а как о континууме.

При этом плотности  $\rho$  и  $\vec{j}$  разделяются на две части, зависящие от свободных и от связанных зарядов. Последние определяются через векторы электрической поляризации  $\vec{P}$  и намагниченности  $\vec{J}$  по формулам

$$\rho = -\text{div} \vec{P}, \quad \vec{j} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{P}}{\partial t} + \text{rot} \vec{J}. \quad (29)$$

Что касается первых, то плотность тока определяется формулой  $\vec{j} = \frac{\sigma \vec{E}}{c}$ ,

где  $\sigma$  — коэффициент электропроводности (в э.м. единицах), а  $\rho$  считается равной нулю (в проводниках электрический заряд распределяется на поверхности). Таким образом, уравнения Максвелла-Лоренца (10) и (14) принимают вид

$$\begin{aligned} \text{rot} (\vec{H} - 4\pi \vec{J}) - \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} (\vec{E} + 4\pi \vec{P}) &= \\ = 4\pi \frac{\sigma}{c} \vec{E}, \quad \text{div} (\vec{E} + 4\pi \vec{P}) &= 0, \end{aligned} \quad (30)$$

между тем как уравнения (11) и (15) остаются без изменения.

Далее полагают  $\vec{E} + 4\pi \vec{P} = \vec{D} = \epsilon \vec{E}$  ( $\epsilon$  — диэлектрическая постоянная), разность  $\vec{H} - 4\pi \vec{J}$  обозначают через  $\vec{H}$ , а  $\vec{H}$  пишут в виде  $\vec{B} = \vec{H} + 4\pi \vec{J} = \mu \vec{H}$  ( $\mu$  — магнитная проницаемость). В случае диэлектриков, совершенно лишенных проводимости ( $\sigma=0$ ), мы получаем таким образом систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \text{rot} \vec{H} - \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= 0 & \text{div} \epsilon \vec{E} &= 0 \\ \text{rot} \vec{E} + \frac{\mu}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} &= 0 & \text{div} \mu \vec{H} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

В простейшем случае однородной среды ( $\epsilon$  и  $\mu$  постоянные) отсюда получается для  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  уравнение вида

$$\nabla^2 \psi - \frac{\epsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{dt^2} = 0, \quad (32)$$

выражающее тот факт, что *усредненное* поле в подобной среде распространяется так же, как истинное поле в пустоте, но не со скоростью  $c$ , а со скоростью  $\sqrt{\frac{c}{\epsilon \mu}}$ . Отсюда, между прочим, следует, что показатель преломления однородной среды по отношению к пустоте равен  $\sqrt{\epsilon \mu}$ , или практически  $\sqrt{\epsilon}$  (за исключением медленных колебаний в ферромагнитных телах).

Литература: Я. И. Френкель, „Курс электродинамики“; Абрагам, „Теория электричества“; Иг. Тамм, „Теория электричества“, т. I; О. Хвольсон, „Курс физики“ (т. IV, V).

Я. Френкель.

**Электричество в сельском хозяйстве**, см. *электротехника в сельском хозяйстве*.

**Электровоз**, см. XX, прил. *железные дороги*, 57; см. XLI, ч. 10, прил. *новейшая техника жел.-дор. транспорта*, 532/49'; ср. *электротехника*.

**Электродинамика**, см. *электричество*; ср. *теория относительности*, XLI, ч. 7, 421/23.

**Электролиз**, см. *электрохимия*.

**Электролитическая диссоциация**, см. *электрохимия*.

**Электромагнетизм**, см. *электричество*.

**Электромагнитная теория света**, см. *электричество*.

**Электрометр**, см. *электротехника*.

**Электромотор**, см. *электротехника*.

**Электронная лампа**, представляет собою устройство, состоящее из нескольких электродов, заключенных в сосуд, в котором газ разрежен до весьма малого давления; в зависимости от числа электродов Э. л. делятся на: диоды (2 электрода), триоды (3), тетроды (4), пентоды (5), гексоды (6 электродов) и т. д. Неоцененная вначале, Э. л. за последние 20 лет достигла, такого прогресса в своих применениях, что ныне трудно назвать ту область физики и техники, в которой она не исполь-

зовалась бы в той или иной форме. С.-А.-С. Ш. еще в 1930 г. насчитывали до 220 ее применений—практических, научных, медицинских, музыкальных; в частности, Э. л. является основой всей современной радиотехники.

История развития Э. л. тесно связана с вопросом об ионизации газов и прохождении через них электрического тока. В 1853 г. Беккерель открыл, что воздух при температуре 1500° делается проводником электричества. Эльстер и Гейтель в 1880 г. обнаружили, что изолированная пластинка вблизи накаливаемой током нити теряет свой заряд. Эдисон в 1883 г. нашел, что при внесении в баллон лампы накаливания изолированного электрода, соединенного через гальванометр с нитью накаливания, в этой цепи обнаруживается электрический ток, направляющийся от нити через гальванометр к этому электроду и далее как бы замыкающийся через пустоту лампы („эффект Эдисона“). Дальнейшие исследования Флемминга показали, что такой электрод-пластина внутри лампы накаливания заряжается отрицательно, до известного потенциала; в том случае, если электроду сообщить извне положительный потенциал, то в цепи идет ток, а при отрицательном ток совершенно прекращается. Он же и де-Форест в С.-А.-С. Ш. первыми применили эту одностороннюю проводимость внутри лампы накаливания в целях детектирования колебаний радиочастоты, создав т. о. первые образцы Э. л. (см. *радиотехника*, XXXV, 364).

Работа всех Э. л. базируется на свойстве металлов испускать при определенных условиях электроны (см. *электронная теория*). Такими условиями, вызывающими испускание (эмиссию) электронов, могут быть: 1) высокая температура металлического электрода, 2) фотоэлектрический эффект—напр., освещение электрода при наличии разреженного пространства; 3) бомбардировка частицами, при высокой скорости последних; 4) контакт с электровозбужденными молекулами или атомами; 5) действие сильного электрического поля. В случае воздействия первого фактора, Э. л. называются термоэлектронными, при наличии вто-

рого условия—фотоэлектрическими элементами (или фотолампами). На практике—и в дальнейшем изложении—под Э. л. понимают устройства, использующие преимущественно первый фактор.

В Э. л. всех типов и назначений одним из электродов является катод, всегда могущий накаливаться извне до значительной температуры. С повышением последней увеличивается скорость „свободных“ электронов (в промежутках между атомами металла); двигаясь в металле все быстрее, такие электроны в дальнейшем испускаются с поверхности катода в окружающее разреженное пространство; „испарившись“, электроны, представляющие собою заряд электричества, уже совершенно не зависят от свойств излучившего их катода. Разреженное пространство в Э. л. („вакуум“) необходимо как для того, чтобы избежать окисления катода при температуре, обеспечивающей вылет электронов, так и в целях предоставления излученному электрону более свободного пути внутри Э. л.: при плохом вакууме молекулы воздуха, более тяжелые, чем электроны, мешают движению испарившегося электрона и направляют его обратно в катод, из которого он вылетел. Столь важный поэтому для Э. л. хороший вакуум является главной трудностью при производстве. Откачивается воздух из сосуда (стеклянного, реже металлического), и обезгаживаются электроды; достигаемая степень вакуума характеризуется цифрами остаточного давления—от миллионных до стамиллионных долей *мм* ртутного столба; но даже и при таком разрежении оставшиеся в Э. л. газовые молекулы находятся в среднем на расстояниях ок. 0,001 *мм*, а число их в 1 *куб. см* выражается сотнями тысяч миллионов.

Вторым, общим для всех Э. л., электродом является анод-электрод, которому сообщается положительный (относительно катода) потенциал (см. *электричество*); испускаемые катодом электроны притягиваются анодом (рис. 1). Следует помнить, что обычно принимаемое (от + к —) направление тока во внешней цепи противоположно истинному направлению потока электронов.

При устройстве катода (т. е. нити накала) из вольфрама для получения заметной эмиссии электронов нужно довести металл до белого каления.

Стремление получить „испарение“ электронов при низких температурах привело к тому, что чистый вольфрам практически используется только в мощных лампах. Для всех прочих типов Э. л. применяют „активированные“ нити накала; наиболее распространенными из них являются торированные и оксидированные. Первые из них, вольфрамовые, но с примесью 1%—2%

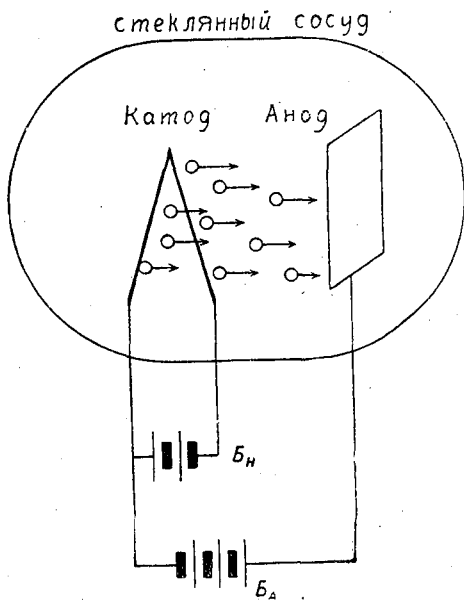


Рис. 1. Схема диодной Э. л.:  $B_n$ —батарея накала;  $B_a$ —батарея анода.

окси тория, дают электронную эмиссию уже при яркокрасном калении; при этом вокруг нити образуется тонкая пленка из атомов тория, толщиной в одну молекулу. Эмиссия электронов происходит из этого слоя при сравнительно низкой температуре, при которой атомы вольфрама могут удерживать атомы тория, но один атом тория другого атома тория удержать не в состоянии: как только из глубины нити появляется атом тория на то место, которое уже раньше было занято другим атомом тория, этот последний

отрывается и улетает. При накале торированной нити в  $1700^{\circ}$  число электронов, испускаемое ею (и, след., сила тока), получается примерно в 3.000 раз больше, чем при чисто вольфрамовой нити с накалом в  $2500^{\circ}$ . При перекале таких Э. л. слой тория может весь испариться—тогда эмиссия прекратится: однако, соответствующим режимом нить можно реактивировать, т. е.

торые и являются центрами усиленного испускания.—Примерами различных катодов в Э. л., фабрикуемых в СССР, могут служить типы: ГКВ-4 (с вольфрамовым катодом), ПТ-2 (микро)—торированная нить, и УБ-107 (оксидная с барием).

На рис. 2 показаны в виде двух наклонных прямых (для вольфрамового катода и оксидного) зависимости тока эмиссии от нагревания катода; прямая линия, дающая те же зависимости для торированного катода, проходит между начерченными прямыми, ближе к линии оксидного; при расчете принято, что поверхность катода — 1 кв. см (сила тока эмиссии прямо пропорциональна поверхности катода).

Степень накала нити характеризуется мощностью в ваттах, поглощаемой нитью от того источника эл. энергии, к которому она приключена („батарея накала“—Бн на рис. 1).

В практике принято характеризовать накал силой тока эмиссии на единицу затрачиваемой мощности накала, именно—величиной  $H = \frac{I_A}{P_{\text{вар.}}}$  — мерой

накала, измеряемой в  $\frac{\text{мА}}{\text{Вт}}$

(миллиамперы/ватт); кривые равных мер накала изображены на рис. 2. Порядок величин меры накала следующий: а) для

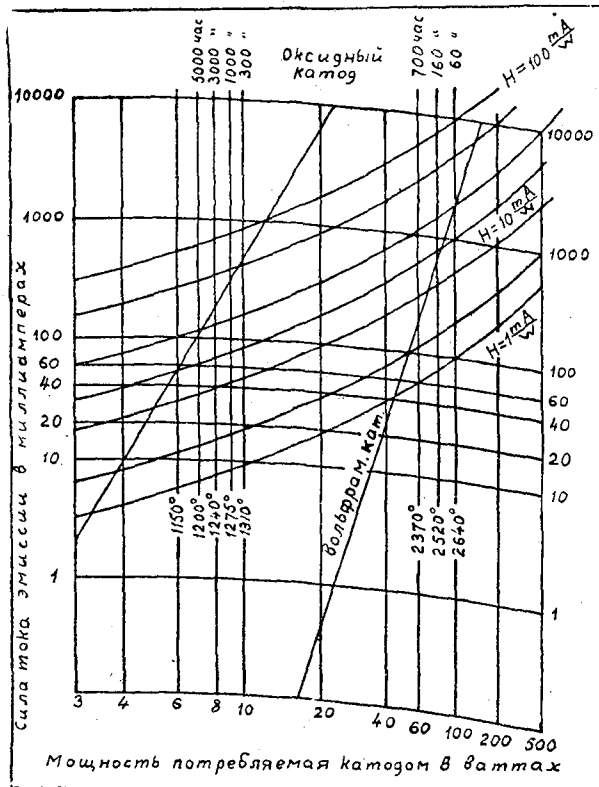


Рис. 2. Характеристика тока эмиссии Э. л.

вновь вызвать на ней слой тория.—Еще более экономичными являются Э. л. с оксидированным катодом. Никелевые или платиновые нити, покрытые оксидами бария и стронция, уже при темнокрасном калении дают обильную эмиссию электронов, требуя для своего накала мощности в десятки раз меньшие сравнит. с вольфрамовым катодом: это объясняется электролитическим разложением окислов, при чем жидкий металл образует на поверхности слоя мельчайшие островки, ко-

вольфрамовых нитей—2-7; б) для торированных—30-60; в) для торированных карбидных (с прибавкой к нити углерода для уменьшения чувствительности к плохому вакууму и перекалу)—ок. 120; г) для оксидных—80-100; д) для азидных (при обработке их барий осаждается из паров азотистых соединений; абс. температура ок.  $740^{\circ}$ )—ок. 200. Накал оксидных и азидных Э. л. почти не виден, почему их называют также „темными излучателями“.

Естественно, что с увеличением эмиссии путем усиления накала ускоряется и изнашивание нити; срок службы Э. л. указан на рис. 2—в функции от режима накала; поэтому завод всегда

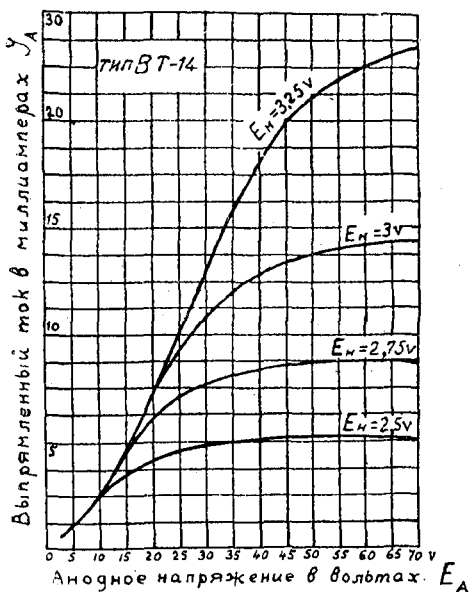


Рис. 3. Характеристика выпрямительной лампы ВТ-14 (К-2Т).

указывает то напряжение накала, при котором должна нормально работать Э. л.

В предыдущем предполагалось: потенциал анода настолько велик, что последний притягивает все испускаемые нитью электроны; такой ток называется током насыщения—он не зависит от анодного напряжения. Обычно на практике анодный потенциал бывает недостаточен—тогда ток эмиссии и при постоянном накале изменяется вместе с этим напряжением— $E_A$ : он тем больше, чем выше анодное напряжение, и именно  $I_A = A E_A^{3/2}$  (т. наз. „закон трех вторых“, где  $A$ —величина для данной Э. л. постоянная). Рис. 3 дает „характеристику диода“—зависимость, типичную для всех диодов—для весьма распространенной в СССР Э. л. марки

ВТ-14 (К-2Т) производства ВЭСО: при слабом накале ( $E_n = 2,5$  вольт) уже при потенциале анода в 30—35 вольт ток больше не возрастает, т. е. все „испаренные“ нитью электроны притягиваются анодом; если же  $E_n = 3,25$  V, то даже 50 V на аноде недостаточно, чтобы притянуть все электроны.

Поток электронов, движущийся от катода к аноду, несет определенное количество отрицательного электричества и образует, следовательно, некоторый пространственно распределенный заряд, который вызывает появление поля, направленного обратно полю анода, задерживает движение электронов и может заставить их двигаться обратно к нити—катоде. Это электронное облако (называемое „пространственным зарядом“) увеличивает свою плотность близ поверхности нити до большой величины,—поэтому только более быстрые электроны могут прорываться через этот барьер. Такие диоды могут быть использованы для превращения переменного тока в постоянный: этот процесс в технике сильных токов называется выпрямлением, а в случае очень малых сил токов—детектированием. Для детектирования ныне применяются тетроды, триоды. Для целей же выпрямления—диоды, называемые выпрямителями, или кенотронами, имеют повсеместное значение, в частности в радиопередатчиках и радиоприемниках (см. *радиотехника*, 391), для питания постоянным током анодов Э. л. радиостанций. Кенотроны

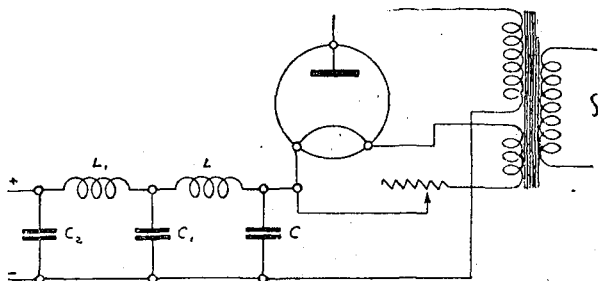


Рис. 4. Схема лампыного выпрямителя с полным питанием от переменного тока и с фильтром для сглаживания выпрямленного тока.

строятся для приемников и усилителей—для выпрямленного тока от  $mA$  до  $A$  и напряжения от десятков до тысячи V; а в передатчиках—на напря-

жение до сотни тысяч  $V$  при токе силой до десятков ампер. Практическая схема кенотрона дана на рис. 4. Ток через Э. л. пойдет только в те моменты, когда на аноде будет приходиться плюс; при минусе на аноде тока не будет. Переменный ток выпрямится (рис. 5),

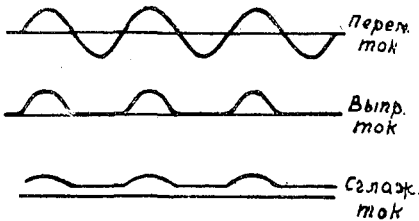


Рис. 5. Графическое представление выпрямления в Э. л.

хотя в такой Э. л. половина тока будет „срезана“ диодом; кроме того, ток будет не постоянным, а пульсирующим. Для сглаживания толчков пульсирующего тока включается фильтр (ср. *телефон*, XII, ч. 7, 281/82).

Фильтры в основном состоят из системы емкостей (конденсаторов) и самоиндукций (катушек), соответственно включаемых. В фильтре для сглаживания пульсаций обычного переменного тока (50—60 пер. в сек.) конденсатор  $C$  (рис. 4) служит „буфером“ (емкостью в одну или несколько микрофарад): за время прохождения тока через выпрямитель часть переносимых им зарядов скопится в конденсаторе и затем разряжается в периоды, когда ток через выпрямитель не проходит (нижняя кривая на рис. 5.) Для устранения все еще остающихся, хотя и малых пульсаций включают катушку самоиндукции  $L$  (с железом, несколько генри): она препятствует прохождению пульсаций, но свободно пропускает постоянную часть всего выпрямленного тока. Второй конденсатор  $C_1$  еще более сглаживает ток; если шум все же остается, то применяют вторую, иногда и третью, „ячейку“ из  $L_1$  и  $C_2$ ; обычно требуется, чтобы пульсации выпрямленного тока не превышали 0,1% общего значения тока.

По схеме рис. 4 и накал нити производится тем же переменным током от специальной обмотки на трансформаторе. Выпрямленный ток отбирается во внешнюю цепь от точек + и -, при чем клемма, соединенная с нитью, является положительным полюсом. Ясно, что, применяя 2 выпрямителя, возможно использовать обе полуволны переменного тока и получить ток с меньшими пульсациями; с этой целью кенотрон ВТ—14 (см. рис. 3) имеет два самостоятельных анода, расположенных вертикально один над другим, вдоль оси которых проходит общая нить накала; ток насыщения его — 30-50  $mA$ ; ток накала — ок. 0,5  $A$ ; средний срок службы ок. 500 часов.

Наиболее распространенной категорией Э. л. является триод, получающийся из диода путем введения в Э. л. третьего, решетчатого электрода, называемого сеткой, расположенной на пути электронов между катодом и анодом. Сетка, заряжаемая положительно или отрицательно, является, как и анод, источником электрического поля; но она расползается очень близко к нити и влияет на электроны значительно сильнее, чем анод. Так как ее тонкие нити занимают очень мало места, а электроны летят весьма быстро, то они на сетку Э. л. почти не попадают; т. о. сетка только воздействует на силу тока, который весь (почти) идет на анод: при положительном (относительн. нити) заряде сетки анодный ток увеличивается, при отрицательном — уменьшается; если к сетке приложено переменное напряжение, то кривая на рис. 6 представит силу тока в анодной цепи.

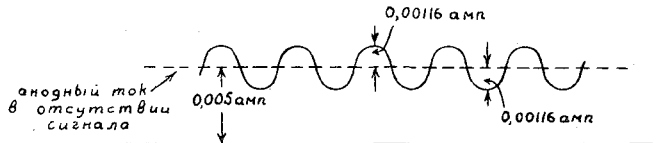


Рис. 6. Характеристика тока в анодной цепи триода.

Следов., анодный ток при постоянном накале нити м. б. изменен двояко: изменением либо  $E_A$ , либо  $E_C$  (напряжения на сетке); поэтому закон трех вторых для триода напишется так:

$$I_A = A (E_A + \mu E_C)^{3/2}; \mu — коэффициент$$

усиления Э. л. (всегда  $> 1$ ), указывающий, во сколько раз потенциал сетки  $E_c$  действует сильнее (на анодный ток), чем потенциал анода.

Характеристикой триода являются кривые  $I_A = f(E_c)$  при  $E_A = \text{пост.}$  Для пространственной в СССР триода УБ-107 эти кривые даны на рис. 7; из него следует, что для увеличения  $I_A$  с 3,75 до 5,9 мА, при  $E_c = 0$ ,  $V$  и  $E_A = 80$  В (точка 1) можно: или  $E_A$  (анодное) поднять на 20 В (точка 2), или  $E_c$  (на сетке) увеличить только на 1,6 В (точка 3); отсюда получается

$$\mu = \frac{\Delta E_A}{\Delta E_c} = \frac{20}{1,6} = 12,5;$$

для различных триодов  $\mu$  колеблется от 3 до 300. Отличительными параметрами Э. л. являются также: 1) внутреннее сопротивление Э. л.:  $R_i = \frac{\Delta E_A}{\Delta I_A}$  при  $E_c = \text{пост.}$ ;

для УБ-107, по рис. 7:  $\Delta E_A = 20$  В,  $\Delta I_A = 5,9 - 3,75 = 2,15$  А; поэтому  $R_i = 9.300$  ом; разные Э. л. имеют  $R_i$  от 1.000 до 150.000 ом. 2) Крутизна характеристики:  $S = \frac{\Delta I_A}{\Delta E_c} \left( \frac{\text{мА}}{\text{В}} \right)$  при  $E_A = \text{пост.}$ ;

для УБ-107 имеем  $S = \frac{2,15}{1,6} = 1,4 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$ ; встречается  $S$  от

$$0,2 \frac{\text{мА}}{\text{В}} \text{ до } 20 \frac{\text{мА}}{\text{В}}.$$

Эти параметры связаны между собою уравнением:  $S \cdot R_i = \mu$ ; иногда вводят еще 3) добротность Э. л.  $G = \mu S$ , исчисляемую в  $\frac{\text{мВ}}{\text{В}^2}$ ;

для УБ-107  $G = 17,5 \frac{\text{мВ}}{\text{В}^2}$ ;  $G$  изменяется для триодов от 3 до сотни.

Триоды на практике используются как ламповые усилители, детекторы и генераторы (см. радиотехника). — Наибольшее применение Э. л. имеют как усилители не только в радиотехнике, но и в проводочной связи (трансляции), а также в целом ряде других отраслей знания. Ранее (см. радиотехника, 415/17) приведены были 3 основные схемы усиления (коэффициент усиления Э. л.  $\mu$  обозначен был через  $K_0$ ): 1) усиление посредством сопротивления (см. радиотехника, рис. 67—при чем  $R_1$  на рис.

соответствует  $R$  в тексте; коэффициент усиления схемы  $K = \frac{\mu R}{R_i + R}$ ); 2) усиление посредством реактивных катушек (дресселей):  $K = \frac{\mu X}{\sqrt{R_i^2 + X^2}}$ ; схе-

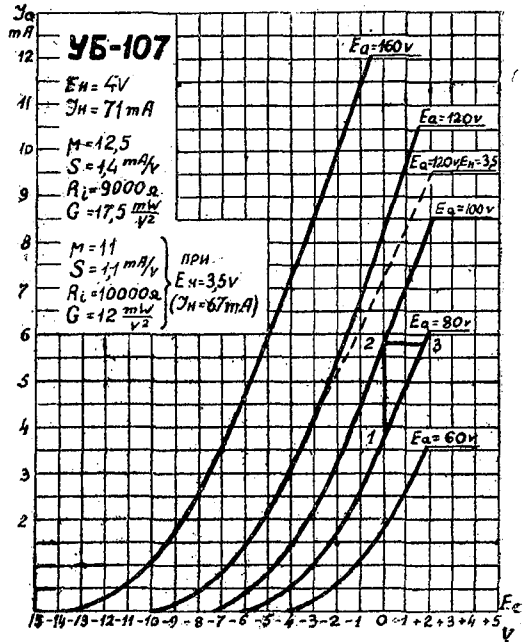


Рис. 7. Характеристика Э. л. УБ-107.

ма его остается такой же, как на рис. 67, лишь вместо активного сопротивления надо включить реактивную катушку; 3) усиление посредством настроенных контуров (там же, рис. 69);

здесь  $K = \frac{\mu L}{L + R_{вн} RC}$  (для резонанс-

ной частоты); здесь  $R_{вн}$ —(активное) сопротивление катушки  $L$ . Нередко встречается также: 4) усиление посредством трансформаторов, как при высокой (там же, рис. 68) частоте, так и при низкой, звуковой, частоте; при низкочастотном усилении (рис. 8) при трансформаторе с отношен. числа витков вторичной обмотки к первичной (в анодной цепи)— $n$ —коэффициент усиления

одной ступени:  $K = \frac{\mu R_c}{n R_i + \frac{R_c}{n}}$ , где

$R_0$  — сопротивление пространства сетчатый Э. л.; обычно  $R_0 = 4 - 16 / R_1$ ; наиболее выгодное  $n = \sqrt{\frac{R_0}{R_1}}$ ; тогда наибольший коэффициент усиления схемы  $K = \frac{\mu n}{2}$ . Мощность усиленного

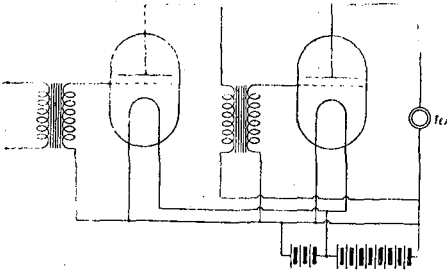


Рис. 8. Схема усилителя низкой частоты на трансформаторах.

(анодного) тока: предельная возможная  $P_{\text{вых. пред.}} = 0,5 [E_A \cdot I_A]$ ; во избежание искажений используют лишь 5—10% этой величины: напр., для Э. л. УБ-107 при  $E_A = 80V$  и  $I_A = 3,75 mA$  (при  $E_0 = 0$ ):  $P_{\text{вых. пред.}} = 0,5 (80 \cdot 0,00375) = 0,15 W$ ; громкоговоритель (см. радиотехника, XXXV, 421/24) в среднем требует 0,10—0,5W неискаженной мощности.

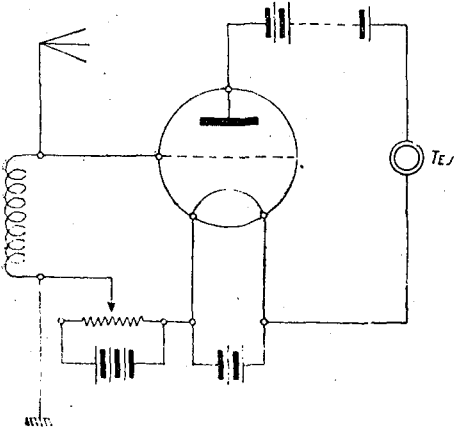


Рис. 9. Схема анодного детектирования триодом.

Триод, как детектор, применяется в двух вариантах: 1) при схеме „анодного детектирования“ (рис. 9) используют не прямолинейные части харак-

теристики (рис. 10); в этих местах увеличение в силе анодного тока (точки 1', 3', 5', 7'), когда сетка делается положительной (точки 1, 3, 5, 7), больше уменьшения анодного тока (2', 4', 6', 8'), когда на сетке отрицательный потенциал (2, 4, 6, 8). Разница этих величин дает „выпрямленный“ ток колебаний (пунктирная кривая), уже действующий на мембрану телефона и т. д.; 2) из вариантов „сеточного детектирования“ наиболее применяется „схема с гридликом“ (рис. 11): в цепь сетки включается детекторный конденсатор  $C$  (емкостью в 150—500 см) и большое сопротивление  $R$  (один-несколько миллионов ом). Принимаемые антенной колебания ( $a$  на рис. 12) заряжают обкладки конденсатора и сетку то положительно, то отрицательно. Но положительный заряд не может удержаться на сетке, он уничтожается вылетающими с нити электронами; по сетке растекается отрицательный заряд соединенной с нею обкладки, остающийся на сетке, т. к. она изолирована от антенны конденсатором. Каждое проходящее колебание оставляет на сетке след в виде некоторого отрицательного заряда; заряд накапливается и затем достигает своего предельного значения. Итак, напряжение на сетке делается в среднем отрицательным (рис. 12a); уменьшается среднее значение анодного тока (рис. 12c), ток в телефоне падает (рис. 12d), и мембрана производит щелчок. Большое сопротивление не мешает накоплению на сетке кратковременных зарядов; однако, оно достаточно для того, чтобы отвести их как только явится более продолжительный промежуток времени; поэтому  $R$  и назыв. „гридликом“ (букв. „утечка сетки“).

Известен также способ модуляции гридликом (см. радиотехника, XXXV, 398, рис. 44); внутреннее сопротивление Э. л.  $M$  и является утечкой сетки генераторной лампы  $G$ , при чем это сопротивление, изменяющееся в согласии со звуковыми колебаниями, все изменения точно передаст и сетке генератора; в последние годы конденсатор  $C$  большей частью не включается.

В области генерации эл. колебаний триодная форма Э. л. является также



наиболее распространенной (см. подробное описание *радиотехника*, 387/98); для облегчения самовозбуждения  $\mu$  у генераторных ламп делается очень большим; анодное напряжение исчисляется почти всегда тысячами вольт для получения большей колебательной мощности. Каждая из возможных схем работы генератора с самовозбуждением требует выполнения определенных условий для самовозбуждения; для простейшей по рис. 31 (см. *радиотехника*, XXXV, 388) таковым является:

$$M \geq \frac{1}{\mu} (L + CR R_1),$$

где  $M$  — коэффициент взаимной индукции между  $L$  и  $L_1$ , а  $R$  — активное сопротивление контура  $LC$ . Полезная мощность Э. л. зависит от той мощности, которая м. б. „рассеяна на аноде“ (т.е. затрачена на нагревание его — не

аноме. Наприм., генерат. лампа ГКВ—4 при  $E_A = 800 \text{ V}$  и  $I_A = 85 \text{ mA}$  рассеивает

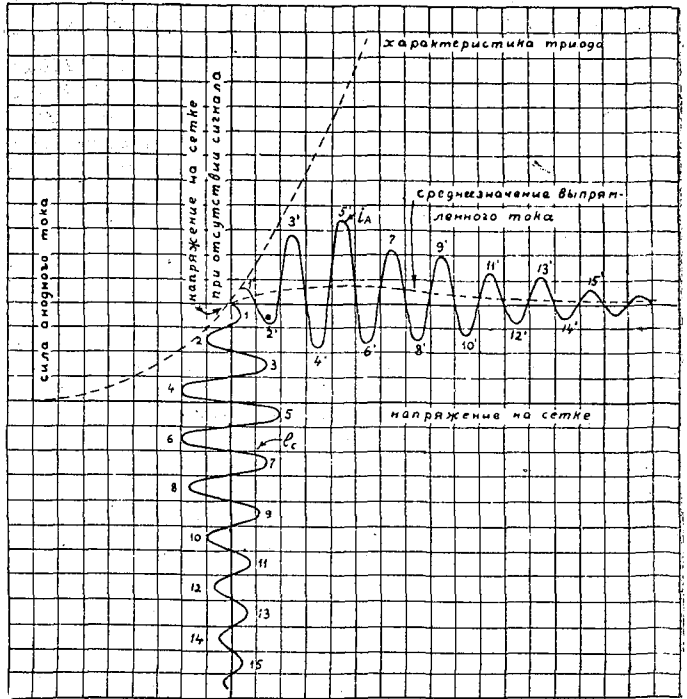


Рис. 10. Графическое представление анодного детектирования.

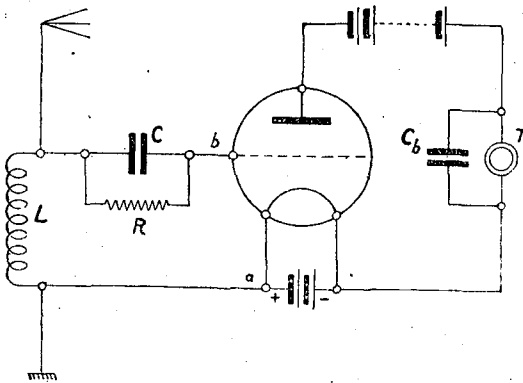


Рис. 11. Схема сеточного детектирования утечкой.

выше красного каления); обычно полезная (отдаваемая лампой в колеб. контур) мощность равна рассеиваемой на

на аноде  $P_A = 0,5 (800 \cdot 0,085) = 34 \text{ W}$ , — и примерно столько же мощности отдает в виде колебательной энергии. На рис. 36 (см. XXXV, 391) дан фотоснимок одного из мощных триодов — генераторной лампы на  $20 \text{ kW}$  рассеиваемой мощности.

Из тетродов ныне почти исключительное распространение в приемных и усилительных схемах, а также в генераторных малой и средней мощности получили „экранированные лампы“, т.е. Э. л. с экранирующей сеткой (или Э. л. с экранированным анодом). Они появились в результате стремлений: 1) побороть вредную внутреннюю емкость Э. л., вызывающую самопроизвольную генерацию (см. *радиотехника*, XXXV, 407), и 2) увеличить коэффициент усиления Э. л. —  $\mu$ . Между обычной контрольной сеткой и анодом располагается (рис. 13) вторая

сетка (назыв. „экранирующей“) так обр., что вредная внутренняя емкость между анодом и обычной сеткой практически

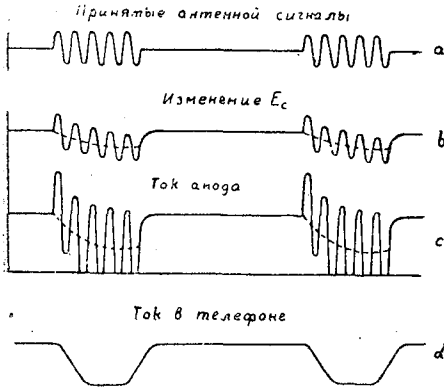


Рис. 12. Графическое представление сеточного детектирования.

исчезает. Для этого ей, по схеме (рис. 14), сообщают положительный потенциал (около половины  $E_A$ ), остающийся неизменным; при этом линии эл. поля

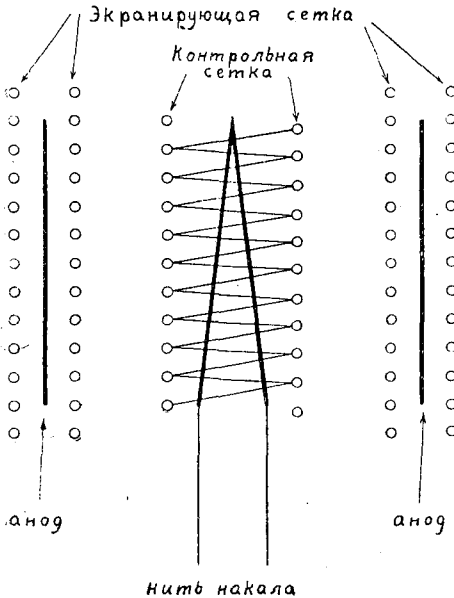


Рис. 13. Расположение электродов в тетроде (экранированной Э. л.).

анода почти все оканчиваются на экранирующей сетке, а электроны, пройдя через контрольную сетку, в своем значительном большинстве проскакивают между витками экран. сетки и попадают

на анод. Коэффициент усиления экран. Э. л.— $\mu$  доходит до 1000;  $R_i$  — порядка сотен тысяч ом; добротность— $G$ —измеряется сотнями, до тысячи  $\frac{mW}{V^2}$ .

Из пентодов ныне распространением пользуется „пентод с противодинаatronной сеткой“, в СССР и Европе сокращенно именуемый просто „пентодом“; его электроды: анод, катод и 3 сетки. В триодах и особенно в тетрадах нельзя значительно увеличивать  $\mu$  и  $S$ , т. к. если напряжение на (экранир.) сетке

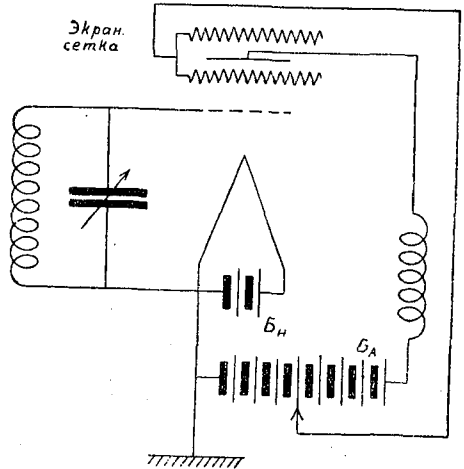


Рис. 14. Схема включения тетрода (экранированной Э. л.).

делается близким к напряжению на аноде, то ударяющийся об анод электрон сможет выбить из металла анода „вторичный“ электрон, попадающий на (экран.) сетку; это явление назыв. динаatronным эффектом. Поэтому в пентоде между анодом и экран. сеткой вводится третья („противодинаatronная“) сетка, коротко соединенная с нитью Э. л.; тогда вторичные электроны не могут уже направляться с анода на (экран.) сетку. Пентод по своему коэффициенту усиления и крутизне заменяет две обычные Э. л. при чистоте передачи лучшей; пентод СВ—146 имеет

$S = 2,4 \frac{mA}{V}$ ,  $\mu = 100$  и  $G = 240 \frac{mW}{V^2}$  при малом, сравнительно с экранир. тетродом, сопротивлении  $R_i = 20.000$  ом; поэтому он мог отдать до 4 ватт неискажен-

ной мощности; т. о. один пентод может питать до сорока громкоговорителей.

Во всех ламповых устройствах, предназначенных для генерации эл. колебаний, в частности в передающих радиостанциях, основными элементами схемы являются триоды, диоды (выпрямители), иногда и тетроды. В свою очередь новейшие ламповые приемники являются ярким доказательством многогранности применения Э. л. во всех ее видах. На рис. 15 изображена схема четырехлампового приемника типа ЭКЛ-4 завода им. Казинко. Справа на схеме — двойной диод для двухполупериодного выпрямления переменного тока от обычной электрич. сети, подключаемый через трансформатор.

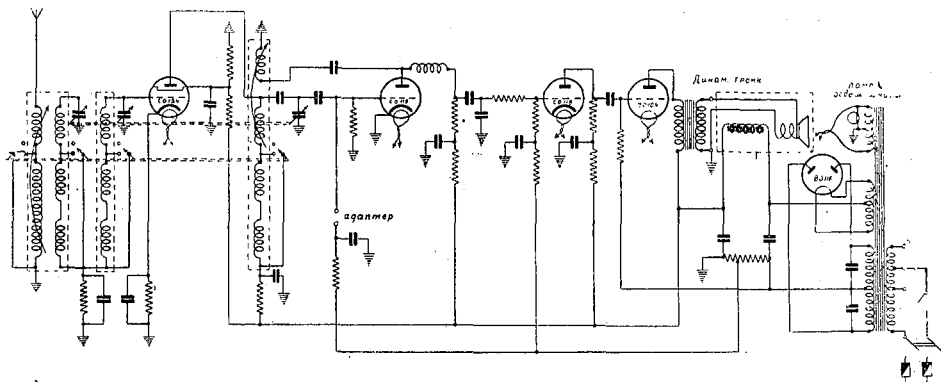


Рис. 15. Схема приемника ЭКЛ-4.

Три правых Э. л. — триоды, при чем две правых являются усилителями низкой частоты, а третья служит детектором. Левая лампа — тетрод. Вместо двух правых триодов можно установить один пентод, дающий почти эквивалентное усиление. Три левых лампы „с подогревом“: в них катодом служит тонкая фарфоровая трубочка, покрытая снаружи металлическим оксидированным слоем; накаливание ее производится проволокой внутри трубочки, нагреваемой переменным током; т. о. получается приемник с полным „питанием от сети“ — без того жужжания, которое имеет место при накале катода прямо переменным током (в крайней правой лампе жужжания нет потому, что катодом ее служит толстая — относительно — нить, с

большой тепловой инерцией). Конструктивно этот приемник, выпускаемый в 1934 г. в десятках тысяч экземпляров, оформлен в одном ящике вместе с динамическим громкоговорителем (*дин. громк.* на фиг. 15), см. *радиотехника*; 2 клеммы с надписью „адаптер“ предназначены для включения звукоусилителя (адаптера) электрорадиографофона. В журнале „Радиоброит“, 1931. №№7/8, даны стандарты Э. л. для СССР, вошедшие в силу с конца 1931 г.

*Современные конструкции Э. л.* За последние 3—4 года развитие радиотехники шло в значительной степени под знаком прогресса в конструкциях Э. л.; последние, особенно в радиопри-

емном деле, сделались ведущим звеном радиотехники; весьма часто теперь схема и конструкция радиоприборов приспособляется к лампе. Мощные лампы (генераторные, модуляторные и усилительные), предназначенные для передающих радиостанций, достигают теперь мощности в 100, 200 и даже 500 киловатт; все большее распространение получают в качестве усилительных Э. л. тетроды с экранирующей сеткой. Особенно велик прогресс в области приемных Э. л. Последние можно разделить на 2 группы: Э. л., питаемые от батарей (постоянным током), и Э. л., работающие непосредственно от сети электрического тока. Первая группа ламп применяется для работы приемника в местностях, лишенных сети электрического освещения, и в пере-

движных радиостанциях (в частности в военных). Все лампы этой группы за редкими исключениями за границей выделяются для накала, требующего напряжения всего лишь 2 В.

Значительно большее распространение имеют Э. л. второй группы, „подогревные“.

Диоды попрежнему встречаются только в качестве выпрямительных ламп; появились кенотроны с высоковольтным катодом, позволяющим включать в осветительную сеть без трансформатора (напр.  $E_n = 220V$ ,  $I_n = 0,032 A$ ).

Триоды используются гл. обр. как детекторы, как усилители и как оконечные лампы. Одним из образцов достижений в этих лампах служат ниже приводимые параметры лампы (английской) „Mazda“:

$$\mu = 75; S = 6,5 \frac{mA}{V};$$

$$R_i = 11500 \Omega \text{ и } G = 490 \frac{mW}{V^2}. \text{ Оконечные}$$

триоды характеризуются гл. обр. небольшим внутренним сопротивлением  $R_i$  (порядка тысячи ом); характеристики их довольно разнообразны; пример — советская Э. л. УО — 104 ( $\mu = 4,0; S = 3 \frac{mA}{V}; R_i = 1300 \Omega; G = 12 \frac{mW}{V^2};$

$P_{\text{вых. неизм.}} = 2 W$ ).

Тетроды в форме экранированных Э. л. получены уже с такими параметрами, как  $\mu = 3000$ , при  $S = 5 \frac{mA}{V}$ , что дает добротность  $G = 15000 \frac{mW}{V^2}$  (тип „Mazda“).

Пентоды проникли в область высокой частоты и частично вытеснили экранированную лампу. Они устраиваются и с переменной крутизной и регулируемым напряжением на противодинамронной сетке; больше того, часто они применяются и в качестве детектора. 1933 г. прошел, особенно в Америке, под знаком всеобщего применения в приемниках пентодов, ставших почти универсальной лампой. Естественно, что параметры их сильно разнятся в зависимости от типов.

Питание большинства подогревных ламп следующего порядка:  $E_n = 4V$ ,  $I_n = 1A$ ;  $E_A = 200V$ ;  $E_{\text{экран.с.}} = (60-80)V$ .

Такой прогресс в конструкциях Э. л. позволил поставить вопрос о полном коэффициенте полезного действия приемника, подразумеваемая под таким коэффициентом выраженное в процентах отношение мощности тока звуковой частоты, отдаваемой в обмотку громкоговорителя, к полной мощности, расходуемой во всех цепях (анодных, накала, сеточных) приемника. Есть усилители, отдающие 10W звуковой частоты при полном расходе энергии от сети только в 50W; за границей же появились экономические батарейные передвижки, дающие неискаженную выходную мощность ок. 300mW, при расходе общей мощности, забираемой от батарей накала и анода, не больше 1W. Подробности о современных Э. л. см. литературу.

Л и т е р а т у р а. Введенский, Б. А., „Физическое явления в катодных лампах“, М.-Л., 1933; Баркгаузен, Г., „Катодные лампы“, пер. с нем., М.-Л.: 1926 (вып. 1), 1929 (вып. 2), 1931 (вып. 3); „СЭП“, справочная книга для электротехников, т. 4, Л., 1929; Дюнуайе, Л., „Техника высокого вакуума“; Гунд, А., „Измерения при высокой частоте“, М.-Л., 1931, пер. с нем.; Merescoff, P., „Electronics Tubes“, N.-Y., 1933; Gutton, C., „La lampe à trois électrodes“, P., 1925; Forstmann, A. and Schramm, E., „Elektronenöhren“, В., 1927; Кубаркин, Л. В., „Применение лампы на 1933 г.“, М. 1933; Клячкин, И. Г., „Основы радиотехники“, М. 1933. Журналы: „Известия Электротехники слабого тока“, с 1932 г.; „Радио-фронт“, с 1931 г.; „Техника радио и слабых токов“, с 1932 г.; „Новости зарубежной радиотехники“, М. 1933; вып. 2 — лампы и усилители; вып. 1 — радиовещательные приемники. Далее — вся литература (включая журналы), приведенная в статье радиотехника.

V. Базиенов.

**Электронная теория.** Современная наука считает отрицательное и положительное электричество за два особого рода агента, или вещества, имеющие зернистое, или, как иногда говорят, „атомное“ строение. Это значит, что они состоят из отдельных (дискретных) мельчайших частиц, могущих двигаться независимо друг от друга, если не считать тех сил, с которыми они действуют друг на друга. Элементарное количество отрицательного электричества получило название *электрон*, положительного — *протон*. Голландский ученый Г. А. Лоренц (см.) должен считаться основателем Э. т. электричества (1895), в которой он впервые ясно и определенно ввел понятие об элементарных электрических зарядах, мельчайших частицах, или атомах электричества. Впрочем, первые работы Г. А. Лоренца в этом направлении относятся

еще к 1880 г.; кроме того, Гельмгольц, Аррениус (1887, 1888), Эльстер и Гейтель (1888) и в особенности Дж. Дж. Томсон (1894) высказывали идеи, более или менее отчетливо выражавшие представление об атомном строении электричества. Стоней (1896) предложил название „электрон“. Термин „протон“ появился сравнительно недавно; впрочем, в английских книгах нередко пользуются термином электрон как для отрицательного, так и для положительного элементарных количеств электричества. Заслуга Г. А. Лоренца заключается в том, что он первый дал детально разработанную математическую теорию электричества, имеющего атомное строение. Эту теорию развивали затем многие ученые, прежде всего Лармор (Larmor, 1896) и Вихерт (1896). Под термином Э. т. обычно подразумевают именно эту математическую теорию. В первоначальном виде она представляла видоизменение, — незначительное по внешней форме, но весьма существенное по внутреннему смыслу, — теории Максвелла (1865). Мы ее рассматривать не будем (подробное ее изложение можно найти в „Курсе физики“ О. Д. Хвольсона, т. V, гл. 4). Мы здесь ограничимся рассмотрением того, что известно о свойствах электрона и протона, и затем перейдем к основному вопросу о строении атома, т. е. к Э. т.

Характеристикой электрона и протона является прежде всего величина их электрического заряда, т. е. то количество электричества, которое в них сосредоточено. Заряды электрона и протона совершенно одинаковы, но, конечно, различного знака. Это значит, что электрон и протон, весьма близкие друг к другу, не вызывают во внешних точках пространства никаких электрических сил, если эти точки не находятся очень близко к электрону или протону. Существует несколько способов определения заряда е электрона. Один из них основан на явлениях электролиза (см. *электрохимия*). Изучение этих явлений показало, что один грамм-эквивалент иона содержит 9.654 электромагнитн. ед. =  $9654 \cdot 3 \cdot 10^{10}$  электростатич. ед. количества электричества. Если последнее число разделить на число Авогадро — Милликаена  $N =$

$= 6,062 \cdot 10^{23}$ , т. е. на число атомов в одном грамм-атоме вещества, то получится заряд е электрона в эл.-ст. единицах (см. *электричество*, III, 21 сл.). Этот способ точных результатов дать не может. Другой способ основан на изучении браунова движения (см.) весьма малых твердых или жидких частиц, находящихся в жидкой или газообразной среде; но и этот способ не может дать удивительных результатов. Удивительные по своей точности измерения заряда е произвел Р. А. Милликен (R. A. Millikan), получивший за них нобелевскую премию. Они были начаты в 1908 г.; окончательные результаты были опубликованы в 1917 г. Прибор, которым пользовался Милликен, имел весьма сложное устройство. Основная мысль его метода заключается в следующем. Две круглые металлические пластинки (диам. 22 см) расположены горизонтально на расстоянии 14,9174 мм друг от друга. Они составляют конденсатор, так что между ними находится электрическое поле, действующее на электроны по направлению снизу вверх. Воздух между пластинками ионизируется при помощи рентгеновых лучей, так что в нем находятся свободные электроны. При помощи пульверизатора вводятся в промежуток между пластинками весьма малые частицы какого-либо твердого или жидкого вещества; на эти частицы оседают электроны из окружающего воздуха, вследствие чего на них действует электрическое поле конденсатора. Всего действуют на частицу две силы: вес по направлению вниз и электрическое поле по направлению вверх. Заряд конденсатора можно так урегулировать, что частица остается неподвижной. Особенно важны те случаи, когда такая частица внезапно начинает двигаться в ту или другую сторону. Это показывает, что к ней присоединился еще один электрон или что от нее отделился электрон. Для наблюдения частица ярко освещается вольтовой дугой, а само наблюдение производится сбоку при помощи микроскопа. Подробная теория движения такой частицы дает возможность вычислить заряд электрона. Постоянно усовершенствуя свой метод, Милликен по-

лучил следующий окончательный результат:  $e = 4,774 \cdot 10^{-10}$  эл.-ст. ед.  $= 1,592 \cdot 10^{-20}$  эл.-магн. ед. Отсюда следует, что одна эл.-ст. ед. количества электричества содержит 2,095 миллионов электронов. При силе тока в один ампер протекает в 1 сек. 0,1 эл.-магн. ед. кол. электричества; в ней содержатся 6,288 триллионов электронов, считая триллион равным  $10^{18}$  (млн. в третьей степени). — Как сказано, заряд протона равен заряду электрона, но обратного знака. Вопрос о том, все ли электроны имеют одинаковый заряд, занимал в течение некоторого времени ученых. Дело в том, что выдающийся физик-экспериментатор Ф. Эренгафт (F. Ehrenhaft) в Вене напечатал в 1909 г. статью с описанием опытов, которые, по его мнению, доказывали, что существуют такие частицы отрицательного электричества, заряд которых во много раз меньше того, который дает Милликен; Эренгафт их назвал суб-электронами. Спор об их существовании продолжался почти 20 лет. Эренгафт и его сотрудники продолжали с поразительной настойчивостью доказывать существование суб-электронов, производя все новые и новые опыты. Только в 1929 г. этот спор прекратился, и в настоящее время никто не сомневается, что все электроны обладают одинаковым зарядом. Предполагается, что электрон имеет шаровидную форму. Радиус  $a$  электрона определить сколько-нибудь точно невозможно. Однако, окольными путями все-таки удалось определить хотя бы порядок размера электрона. Оказалось, что  $a = 2 \cdot 10^{-13}$  см  $= 2 \cdot 10^{-12}$  мм. Цепочка, содержащая 500.000 миллионов электронов, имеет длину, приблизительно равную одному миллиметру.

Переходим к вопросу о массе электрона, при чем следует отличать массу  $m_0$  покоящегося и массу  $m$  движущегося электрона. Изучая движение электрона в электрическом и магнитном полях, можно определить величину  $\frac{e}{m_0}$ , которая называется *удельным зарядом* электрона. До 1913 г. было сделано около 45 определений этой величины. А. Вастеймейер (A. Beestelmeyer) опубликовал в 1919 г. результаты критического

разбора всех этих работ. Как наиболее вероятное значение он дает число

$$\frac{e}{m_0} = 1,76 \cdot 10^7 \text{ эл.-магн. ед.}$$

В настоящее время считается наиболее достоверным число 1,769; впрочем в 1921 г. Беккок (H. D. Babcock) нашел число 1,761. Зная величины  $e$  из опытов Милликена и число  $e/m_0$ , можно найти массу  $m_0$  покоящегося электрона. Оказалось, что

$$m_0 = 0,8996 \cdot 10^{-27} \text{ гр.}$$

или, что масса  $m_0$  в 1.840 раз меньше массы атома водорода. Мы знаем, что один грамм водорода содержит  $6,062 \cdot 10^{23}$  атомов. Отсюда следует, что масса электрона приблизительно равна  $10^{-27}$  грамма, или что один грамм электронов содержит около  $10^{27}$  электронов. О чудовищной величине заряда одного грамма отрицательного электричества можно судить по следующему данным. Сила, с которой взаимно отталкиваются два электрона, весьма мала, меняясь обратно пропорционально квадрату расстояния их друг от друга. Даже если расстояние двух электронов равно одной миллионной доле миллиметра, их взаимное отталкивание приблизительно равно одной сорокатысячной доле веса одного миллиграмма. Однако, легко вычислить, что два грамма электронов, находясь на расстоянии одного миллиона километров друг от друга, отталкиваются с силою, равную весу двадцати миллионов килограммов. Если бы один из них находился на Земле, а другой на Солнце (расстояние 150 млн. км), то сила их взаимного отталкивания равнялась бы весу 1.200 кг. Если бы один находился на Солнце, а другой на Нептуне (расстояние 4.500 млн. км), то отталкивание превышало бы вес 1 кг. Мы видели, как малы размеры электронов. Однако, 1 гр электронов составляет цепь, длина которой равна 4.000 млн. км. т.-е. в 28 раз больше расстояния Земли от Солнца. Заряды электрона и протона одинаковы, но их массы различны. Масса протона равна массе атома водорода. Отсюда следует, что масса протона в 1.840 раз больше массы электрона. Электроны и протоны отличаются друг от друга степенью их подвижности. Электроны чрезвычайно подвижны.

Отдельные свободные электроны встречаются повсюду, напр. в воздухе; огромные их количества составляют потоки электронов. Везде, где мы встречаемся с представлением о движении электричества, мы имеем дело почти только с потоками электронов. Так, напр, сущность электрического тока сводится к течению электронов в проводниках. Катодные лучи, которыми пользуются для получения рентгеновых лучей, суть такие же потоки. Раскаленные тела испускают электроны. В фотоэлектрических явлениях (см. *энергия*) мы имеем дело с электронами. Протоны, наоборот, отличаются высокою степенью неподвижности. Они находятся в определенных местах материи, как будет изложено ниже при разборе вопроса о строении атома. Отдельные свободные протоны могут быть получены лишь в исключительных случаях. В нейтральном теле находится одинаковое число электронов и протонов. Электризация нейтрального тела всегда сводится к передвижению электронов. Положительная электризация нейтрального тела заключается в том, что часть электронов, находящихся в этом теле, переходит от него к телам соседним. Электризация при трении, напр. стекла о сукно, сводится к переходу электронов от стекла к сукну (см. *электричество*). Наука до сих пор не открыла никаких явлений, которые заставляли бы ввести понятие о каком-либо *строении* электрона. В 1926 г. возникло новое учение, исходящее из представления, что все электроны весьма быстро вращаются вокруг оси, проходящей через их центр. Это вращение иногда для краткости называется „спин“, от английского термина spin. Скорость вращения всегда одна и та же, но она может происходить в двух противоположных направлениях. Два электрона, оси вращения которых параллельны, могут отличаться направлением вращения.

*Строение атома.* Наиболее важным из научных достижений, основных на представлении об электронах, является учение о строении атома, возникшее в 1913 г. Оно теснейше связано с учением о квантах, о квантовании, о постоянной  $h$  Планка и др. (см. *энер-*

*гия*). В течение XIX в. химия занималась исключит. только вопросами о составе материи из молекул и молекул из атомов (см. *атом*). На последние наука смотрела как на однородные мельчайш. зернышки данного элемента; система (см. XXXI, 586 сл.) Д. И. Менделеева принималась как факт, но не поддавалась более глубокому разъяснению. Целый ряд явлений давно указывал, что атомы должны содержать электричество. Сюда относятся, прежде всего, явления электролиза. Не могло быть сомнения, что внутри электролита движутся по направлению к электродам отдельные атомы или группы атомов (ионы), при чем одни являются носителями отрицательных электрических зарядов, т. е. электронов, а другие наэлектризованы положительно, т. е., как мы теперь говорим, потеряли электроны. Сюда же относятся многочисленные случаи ионизации газов, при которых возникает свободные электроны, несомненно вырванные из молекул или атомов газов, остающихся в виде положительно наэлектризованных ионов. Далее можно указать на радиоактивные явления (см. *радиоактивность*) и на явления фотоэлектрические (см. *энергия*). С течением времени было предложено не мало гипотез относительно строения атома или, как говорят, моделей атома. Одна из первых принадлежит лорду Кельвину (Kelvin, прежде William Thomson, 1902), который дал такую модель: атом имеет форму сферы, равномерно заполненной положительным электричеством; внутри ее находится такое количество электронов, заряд которых как раз равняется заряду самого шара, так что во внешних точках, не очень близких к его поверхности, атом должен представлять электрически нейтральным. Эта модель была затем широко разработана Дж. Дж. Томсоном (J. J. Thomson, 1910); в течение некоторого времени она пользовалась большим успехом. Дж. Дж. Томсон полагал, что лучистая энергия испускается электронами, колеблющимися внутри положительного шара. Однако, его модель не могла объяснить закономерностей в спектрах, хотя бы простейшую из них, т. е. формулу Баль-

мера для водорода (см. *спектральный анализ*, XLI, ч. 4, 57/58). В 1912 г. Резерфорд (E. Rutherford) построил другую модель атома. По его мысли, атом состоит из ядра положительного электричества, вокруг которого вращаются электроны, подобно тому как планеты вращаются вокруг Солнца. Ядро имеет весьма малые размеры (порядка  $10^{-12}$  см), но в нем сосредоточена почти вся масса атома. Голландский ученый Ван-дер-Брек (Van der Broek) высказал мысль (1913), что число электронов, вращающихся вокруг ядра, равно порядковому числу  $Z$  элемента (см. *элементы*) в таблице Менделеева. Модель Резерфорда не могла объяснить возникновения резких (тонких) спектральных линий. В 1913 г. появились три статьи датского ученого Н. Бора, основателя современного учения о строении атома. Бор всецело принимает модель Резерфорда с дополнением Ван-дер-Брека: ядро атома имеет положительный заряд, равный  $Z$  протонам, где  $Z$ —порядковое число элементов. Теория Бора подробно изложена в статье *спектральный анализ* (см. XLI, ч. 4, 70/76). Здесь мы к ней возвращаться не будем.

Теория Резерфорда-Бора приводит к следующему основному результату: никакой особой материи, как ее прежде понимали, нет; существует только электричество, т.е. протоны и электроны, из которых построены атомы всех элементов. В этом заключается чрезвычайное упрощение нашего мировоззрения: вместо 92-х существенно различных элементов и двух электричеств мы имеем теперь только два электричества. Мысль о превращении одного элемента в другой, теоретически говоря, перестает быть нелепой мечтой алхимиков. Возьмем, напр., ртуть и золото, стоящие в таб-

лице Менделеева рядом под порядковыми номерами 80 и 79. Атом ртути превратится в атом золота, если: 1) от внешних электронов отнять один, что весьма легко сделать, ионизируя пары ртути; 2) вырвать из ядра атома ртути 5 протонов и 4 электрона; 3) произвести внутри ядра атома ртути ту перестановку оставшихся в нем составных частей, которая, вероятно, окажется необходимой. Второе и третье мы сделать не умеем, но может быть со временем научимся.

В статье *спектральный анализ* подробно сказано об электронных слоях и подгруппах. Мы разовьем здесь несколько подробнее ученье о подгруппах, введем новые их обозначения и рассмотрим вопрос о постройке слоев и подгрупп. Так как общее число внешних электронов равно порядковому числу  $Z$  элемента, то ясно, что переход от одного элемента к следующему в этой таблице сопровождается добавлением одного внешнего электрона. Огромный интерес представляет вопрос о последовательной постройке слоев  $K, L, M$  и т. д., если мысленно идти вдоль таблицы Менделеева от водорода ( $Z=1$ ) до урана ( $Z=92$ ). Оказывается, что каждый слой предварительно построен, когда в нем находится 8 электронов. Тогда начинается постройка следующего слоя, которая, однако, в целом ряде случаев прерывается достройкой одного из нижележащих слоев. Слои  $M$  и  $O$  подвергаются одной достройке, при чем число электронов в них возрастает от 8 до 18; в слое  $N$  происходят две достройки, увеличивающие число внешних электронов от 8 сперва до 18, а затем до 32. В следующей табличке указаны все эти постройки и достройки.

Таблица 1.

С л о и	$K$	$L$	$M$	$N$	$O$	$P$	$Q$
Первая постройка . . . . .	2	8	8	8	8	8	не окончен
Первая достройка . . . . .	—	—	18	18	18	не окончен	—
Вторая достройка . . . . .	—	—	—	32	—	—	—

Каждый слой делится на подгруппы. Число подгрупп в каждом слое и число электронов в каждой подгруппе принимаются ныне согласно с

выводами английских ученых Стонера и Мэн-Смита (Stoner, Main Smith), полученными в 1924 г. В следующей табличке указаны число подгрупп в каж-



дом из слоев  $K$ ,  $L$ ,  $M$  и  $N$  (вторая строчка), ныне принятые обозначения этих подгрупп и число электронов в

каждой подгруппе. Остальные слои ( $O$ ,  $P$  и  $Q$ ) даже в уране еще не окончены.

Таблица 2.

$K$	$L$			$M$				$N$							
1	3			5				7							
$K$	$L_{11}$	$L_{21}$	$L_{32}$	$M_{11}$	$M_{21}$	$M_{22}$	$M_{32}$	$M_{33}$	$N_{11}$	$N_{21}$	$N_{22}$	$N_{31}$	$N_{33}$	$N_{43}$	$N_{44}$
2	2	2	4	2	2	4	4	6	2	2	4	4	6	6	8

Индексы (11, 21, 22, 32 и т. д.) следует понимать как сочетания двух из чисел 1, 2, 3 и 4, между которыми следовало бы ставить запятые или черточки; мы пишем, напр., 32 вместо 3,2 или 3-2. Предполагается, что слои построены окончательно и потому общее число электронов в них равно 2, 8, 18 и 32. Та постройка внутренних слоев, которая указана в таблице 1, заключается в добавлении новых подгрупп. При первой постройке всегда возникают первые три подгруппы, содержащие  $2 + 2 + 4 = 8$  электронов. При постройке слоя  $M$  добавляются подгруппы  $M_{32}$  и  $M_{33}$  с 10 электронами, так что получается 18 электронов. При первой постройке слоя  $N$  возникают подгруппы  $N_{32}$  и  $N_{33}$  (10 электронов); при второй — подгруппы  $N_{43}$  и  $N_{44}$  (14 электронов), что и дает окончательно 32 электрона. Исключительно важную роль играют в атоме каждого элемента те электроны, которые находятся в наружном слое, предварительная постройка которого еще не окончена, т. е. число электронов которого не доходит до восьми. Эти электроны называются „валентными“; их число может доходить до семи. Когда наружный слой содержит 8 электронов, то есть первая постройка окончена, вовсе нет валентных электронов. От числа валентных электронов зависят, прежде всего, химические свойства элемента, а также лучеиспускание атома в инфракрасной, видимой, и ультрафиолетовой частях спектра. На наружный слой валентных электронов следует смотреть как на нечто, легко меняющееся в данном атоме. К нему относится то, что было сказано о возможных орбитах и о переходах „странствующего“ электрона от одной орбиты к другой, о возбуждении атома и об испускании им лучистой энергии (см. XLI, ч. 4, 71 сл.). Не только распределение валентных электронов

по возможным орбитах, но и число их в данном атоме может меняться. Это соответствует различным случаям ионизации атома; когда один или несколько валентных электронов выброшены из атома, мы имеем положительную ионизацию; когда к ним присоединяются извне прилетевшие электроны, получается ионизация отрицательная. Внутренние же слои представляют нечто твердо установившееся, готовое, лишь с трудом и при исключительных обстоятельствах подвергающееся изменениям.

В глаза бросается глубокая связь между электронными слоями  $K$ ,  $L$ ,  $M$ ,  $N$  и периодами таблицы Менделеева. Числом валентных электронов определяется то, что в химии называется валентностью элемента. Все элементы одной вертикальной группы таблицы имеют, вообще говоря (опускаем детали), одинаковую валентность. Каждый раз, когда начинается постройка нового слоя, т. е. является один валентный электрон, мы имеем первый элемент нового периода, т. е. щелочной металл. Каждый раз, когда оканчивается первая постройка слоя и число электронов делается равным 8, а валентных электронов вовсе не оказывается, мы имеем последний элемент периода, т. е. инертный газ, в котором отсутствие валентных электронов и является причиной их химической недеятельности (инертности). Постройки усложняют дело и приводят к тому, что периоды содержат не только 8, но и 18 и 32 элемента, в полном согласии с числом электронов в слоях  $M$ ,  $N$  и  $O$ . В виду огромной важности таблицы Менделеева мы проследим постройку всех электронных слоев в связи с возникновением периодов этой таблицы. В скобках мы ставим, рядом с химическим знаком элемента, его порядковое число  $Z$ .

Период I и слой K. Имеем только 2 элемента: водород (1, H) с одним и гелий (2, He) с двумя электронами. Этим постройка окончена, и мы имеем одновалентный водород и инертный (впрочем, не вполне) гелий. Период II (8 элементов) и слой L (8 электронов); в начале щелочной металл литий (3, Li), в конце инертный газ неон (10, Ne). Период III (8 элементов) и слой M (8 электронов при первой постройке); в начале щелочной металл натрий (11, Na), в конце инертный газ аргон (18, Ar). Период IV (18 элементов), первая постройка слоя N (8 электронов) и достройка четвертой и пятой подгрупп слоя M (10 электронов). Сперва начинается постройка слоя N, и мы имеем щелочной металл калий (19, K) и щелочно-земельный кальций (20, Ca). Но начиная со скандия (21, Sc) и до никкеля (28, Ni) идет достройка слоя M. От меди (29, Cu) продолжается дальнейшая постройка слоя N, которая оканчивается у инертного газа криптона (36, Kr). Период V (18 элементов). Начинается постройка слоя O у щелочного металла рубидия (37, Rb); затем идет первая достройка слоя N (подгруппы  $N_{32}$  и  $N_{33}$ ), которая закончена у палладия (46, Pd), и оканчивается первая постройка слоя O, которая закончена у инертного газа ксенона (54, X). Сложнее идет дело в периоде VI (32 элемента). Происходит постройка слоя P от цезия (55, Cs) до инертного газа эманации (86, Em); но она два раза прерывается внутренними достройками. Сперва окончательно достраивается слой N (подгруппы  $N_{43}$  и  $N_{44}$ ), в котором  $6+8=14$  электронов, при чем получают редкие земли от  $Z=58$  до 71. Затем происходит еще достройка слоя O (10 электронов). Период VII не окончен. Теория Бора предсказала, что число редких земель должно равняться 14. Между тем в течение некоторого времени полагали, что их число 15, что элемент  $Z=72$ , который был назван тулий II, также принадлежит к редким землям. Однако, в 1922 г. датские ученые Костер и Хевеси (Coster и Hevesy) открыли новый элемент, который они назвали гафний (Hf). Для него оказалось  $Z=72$ ; он по химическим свойствам очень близок к цирконью и совер-

шенно не похож на редкие земли. Это открытие представляло торжество теории Бора, правильно предсказавшей возможное число редких земель. Эта же теория объяснила также, почему в 4 местах таблицы Менделеева мы имеем более одного элемента в одной клетке, при чем эти элементы химически чрезвычайно похожи друг на друга. Сюда относятся три триады: 1) Fe, Co, Ni, 2) Ru, Rh, Pd, и 3) Os, Ir, Pt и 14 редких земель, которые также надо себе представить как бы сосредоточенными в одной клетке. Отделение редких земель друг от друга представляет огромные трудности, вследствие почти полной тождественности их химических свойств. Сказанное объясняется тем, что эти элементы возникают при достройках внутренних электронных слоев. Таким образом они отличаются друг от друга числом электронов в одном из внутренних слоев. Число же валентных электронов, от которых зависят химические свойства элемента, одинаково в каждой триаде, а также во всех 14 редких землях.

По теории Резерфорда и Бора, атом состоит из ядра, вокруг которого вращаются  $Z$  электронов, где  $Z$  — порядковое число атома в периодической системе Менделеева. До сих пор мы рассматривали почти только эти  $Z$  внешних, или планетарных электронов. Обращаемся теперь к ядру атома, которое содержит  $A$  протонов и  $A - Z$  электронов, где  $A$  — атомный вес элемента. Возникает вопрос о том, как эти составные части ядра атома в нем распределены. Предварительно нам необходимо ближе познакомиться с частицей альфа ( $\alpha$ ), выбрасываемой ядрами радиоактивных элементов (см. радиоактивность, XXXV, 333 сл.) и тождественной с ядром атома гелия. Отсюда видно, что частица альфа состоит из 4 протонов и 2 электронов. Так как масса протона в 1840 раз больше массы электрона, то оказывается, что масса частицы альфа в 7360 раз больше массы частицы бета, также испускаемой ядрами радиоактивных элементов и тождественной с электроном. Не только ядра атомов радиоактивных элементов, но ядра атомов всех элементов (кроме водорода) содержат

частицы альфа; это значит, что протоны и электроны соединены в группы по 4 протона и 2 электрона, т.е. в частицы альфа, число которых наибольшее возможное для данного ядра. Атомный вес  $A$ , равный числу всех протонов в ядре, можно написать в виде  $A = 4n + p$ , где  $n$  целое число, а  $p = 0, 1, 2$  или  $3$ . Очевидно,  $n$  равно числу частиц альфа, а  $p$  — числу свободных протонов в ядре. Весьма важно, что в ядре атома элемента, атомный вес которого нацело делится на 4, вовсе нет свободных протонов. Скорость, с которой вылетают частицы альфа из ядер атомов радиоактивных веществ, колеблется в довольно широких пределах; в среднем она равна 0,06 скорости света. Вследствие большой, сравнительно, массы вылетевшая частица альфа обладает большим запасом кинетической энергии и потому может совершить гораздо большую работу, напр. большее разрушение, чем частица бета (электрон), хотя бы скорость последней равнялась 0,9 скорости света. Частица альфа представляет удивительно стойкое сооружение, которое не распадается ни при каких нам доступных условиях. Это тем более странно, что 4 протона должны были бы взаимно отталкиваться, а 2 электрона не могут их сдерживать. В настоящее время общеприято, что при очень малых расстояниях взаимное отталкивание протонов переходит во взаимное притяжение. То же самое относится и к самым частицам альфа, которые на очень малых расстояниях взаимно притягиваются. Огромная стойкость частицы альфа объясняется на основании следующих соображений. В статье *энергия* изложено, что энергия и масса — величины эквивалентные и что масса  $m$  может превратиться в энергию  $J = mc^2$ , где  $c$  — скорость света. Если  $m$  выразить в граммах,  $J$  в эргах, то  $c^2 = 9 \cdot 10^{20}$ . Грамм-атом гелия имеет массу 4 грамма; он образовался от „соединения“ 4-х гр.-атомов водорода, из которых каждый обладает массой 1,008 (точнее 1,0078) грамма (масса электронов можно пренебречь), так что для гр.-атома гелия должна была бы получиться масса  $1,008 \times 4 = 4,03$  гр. Приходится допустить, что при возникновении гр.-атома гелия

0,03 гр. исчезли, превратившись в энергию. На основании равенства  $J = mc^2$  мы получаем, что при возникновении гр.-атома гелия выделились  $0,27 \cdot 10^{20}$  эргов, которые эквивалентны 300 млн. больших калорий, или 130 миллиардам кэ.м работы. Такую огромную работу пришлось бы затратить, чтобы 4 грамма гелия раздробить на отдельные протоны. При образовании гр.-молекулы наиболее стойких химических соединений выделяется количество теплоты порядка 100 б. калорий, а при возникновении гр.-атома гелия это число в 3 миллиона раз больше! Во столько же раз стойкость частицы альфа больше стойкости известных нам химических соединений. Английский астроном Эддингтон (Eddington, 1923) указал, что если бы из ядер (протонов) водородных атомов, находящихся на Солнце, лишь несколько процентов соединились в ядра гелия (частицы альфа), то освободившейся теплоты хватило бы на лучеиспускание Солнца в течение миллионов лет.

Обращаемся к классическим работам Е. Резерфорда, которому впервые удалось искусственное раздробление ядер атомов некоторых нерadioактивных элементов. Главнейшие из этих работ появились в 1919 г., а затем еще в 1921 и 1922 гг. Мы имеем здесь случай несомненного искусственного разложения атома, ибо ионизация атома представляет неглубокое и легко восстанавливаемое изменение его состава. Мы назовем *активной* такую частицу которая, двигаясь внутри газа, может вызвать ионизацию его атомов, или попадая на поверхность флуоресцирующего экрана, вызывает на ней явление маленькой, весьма кратковременной искорки (сцинтилляции), которую удобно наблюдать при помощи лупы или микроскопа. Такими активными могут быть отдельные электроны, частицы альфа, а также, как оказалось, отдельные протоны, т.е. ионизированные атомы водорода. *Длинною пробега* активной частицы называется длина пути, который может пройти активная частица в данной среде от места ее возникновения до того места, где ее активность перестает быть заметной, напр. прекращается ионизация газа

или сцинтилляция. Длина пробега частицы альфа в воздухе, находящемся под давлением одной атмосферы, колеблется, в зависимости от испускающего ее радиоактивного вещества, от 2,5 см до 8 см; в водороде она около 25 см. Частицы альфа, благодаря их большой энергии и стойкости, могут играть роль снарядов, раздробляющих атомные ядра некоторых элементов. Е. Марзден (E. Marsden), сотрудник Резерфорда, доказал еще в 1914 г., что частицы альфа, проходя через водород, разбивают его молекулы на составные части, при чем могут возникать ионизированные атомы водорода, т. е. свободные протоны. В 1919 г. появился ряд работ Резерфорда. Во второй из них он показал, что частица альфа вырывает свободные протоны из вещества, богатых водородом, напр. из парафина. В четвертой он впервые сообщил миру о раздроблении ядра атома азота. Под влиянием удара частицы альфа вылетают из молекулы азота активные частицы, длина пробега которых равна 23 см. Наблюдения над движением этих частиц в магнитном поле показали с достоверностью, что это были протоны, вырванные из ядра атома азота. Так как для азота  $A = 14 = 4 \cdot 3 + 2$ , то ясно, что в его ядре должны находиться по крайней мере 2 свободных протона, если остальные 12 протонов образуют 4 частицы альфа. Так как протон, выбитый из ядра атома азота, поймав один из вездеходящих электронов, превращается в нейтральный атом водорода, то и стали тогда писать, что Резерфорд извлек водород из азота, что не вполне точно. Сущность великого открытия Резерфорда заключается в том, что он доказал наличие протонов в ядре атома азота и тем подтвердил одно из основных положений теории Бора. В 1921 г. Резерфорд сообщил, что ему удалось вырвать протоны из ядер бора, фтора, натрия, алюминия и фосфора. Атомные веса этих элементов суть числа вида  $4n + 3$ , и только для азота  $4n + 2$ . Любопытно, что протоны вылетают во всех случаях не только по направлению удара частицы альфа, но, особенно для алюминия, по всевозможным направлениям, даже навстречу частице альфа.

Поразительным представляется еще следующий факт: энергия движения протонов, вылетающих из алюминия по направлению удара, — в 1,4 раза, а по направлению обратному — в 1,13 раза больше энергии ударяющих частиц альфа. Это заставляет думать, что по крайней мере часть энергии протона интраатомного происхождения, а именно, что мы имеем дело со взрывом, происходящим в ядре атома, т. е. явлением аналогичным явлениям радиоактивным, стою, однако, разницей, что из ядра атома выбрасывается протон, а не частица альфа или электрон (частица бета). Удар налетающей частицы альфа является здесь причиной этого взрыва. Шесть элементов  $B, N, F, Na, Al$  и  $P$ , из ядер которых Резерфорду удалось выбить протоны, имеют порядковые числа  $Z$ , равные последовательным нечетным числам от 5 до 15 ( $B^5, N^7, F^9, Na^{11}, Al^{13}, P^{15}$ ). Интересным представляется вопрос о судьбе самой ударяющей частицы  $\alpha$ : отскакивает ли она от атомного ядра, из которого она выбила протон, или она застревает в этом ядре? В 1927 г. английским ученым удалось наблюдать два случая несомненного застревания частицы альфа в ядре атома азота. Раздробление ядра атома происходит только в случае особенно удачного удара со стороны частицы альфа. Оказывается, что на, примерно, 10.000 ударяющих частиц альфа приходится только одна, вырывающая протон из ядра атома.

В 1923 г. начали работать над тем же вопросом венские ученые Г. Кирш и Г. Петтерсон (G. Kirsch, H. Pettersson) с сотрудниками, Р. Голубек (R. Holoubek) и др. Их результаты существенно отличаются от полученных английскими учеными, что привело к продолжительному спору. В первой своей работе Кирш и Петтерсон нашли, что бериллий ( $A=9, Z=4$ ), кремний ( $A=28, Z=14$ ) и магний (три изотопа,  $A=24, 25, 26, Z=12$ ) также подвергаются раздроблению. Правила, найденные английскими учеными, здесь не подтверждаются: все  $Z$  суть числа четные, и одно из чисел  $A$  (кремний) нацело делится на 4. В 1927 г. венским ученым удалось (по их мнению) выбить протоны из ядер атома углерода (графит

и алмаз), для которого  $A=12$  также нацело делится на 4. Результаты, полученные для кремния и для углерода, представляют особенно сомнительными. Если бы они оказались правильными, то пришлось бы совершенно изменить наш взгляд на распределение протонов и электронов в атомных ядрах (см. ниже). В 1927 г. начали производить подобные же опыты Боте и Френц (Bothe, Fränzl) в Берлине. Они исследовали все элементы от бора ( $Z=5$ ) до кальция ( $Z=20$ ), но могли заметить выделение протонов только в боре, азоте, магнии и алюминии. Так как магний представляет смесь изотопов, для которых  $A=24, 25$  и  $26$ , вопрос о делимости на 4 здесь остается открытым. Особенно важно, что названные ученые не нашли явления в углероде ( $A=12$ ) и в кремнии ( $A=28$ ). Дальнейшие исследования (1928) по новому методу дали для бериллия, углерода и железа результаты, несогласные с выводами венских ученых, которые, однако (1929), оспаривают правильность нового метода и вновь утверждают, что из атомов углерода могут быть выбиты протоны. Нет сомнения, что все элементы от бора ( $Z=5$ ) до калия ( $Z=19$ ) обнаруживают рассматриваемое явление, кроме углерода ( $Z=6$ ) и кислорода ( $Z=8$ ). Сюда относятся, кроме вышеприведенных, еще неон, магний, хлор, аргон и калий.

Одной из важнейших задач современной физики является решение вопроса о деталях строения атомного ядра, т.е. распределения в нем  $A$  протонов и  $A-Z$  электронов. Уже было сказано, что если атомный вес вида  $A=4n+p$  ( $n$ —целое число,  $p=0,1,2,3$ ), то естественно допустить, что в состав ядра входят  $n$  частиц альфа и  $p$  свободных протонов. Из всех  $A-Z$  электронов  $2n$  электронов входят в состав  $n$  частиц альфа, так что число  $x$  остальных электронов, не „замуровленных“ внутри частиц альфа, равно

$$x = A - Z - 2n = 4n + p - Z - 2n = \\ = 2n - Z + p = \frac{A}{2} - Z + \frac{p}{2}$$

(если  $p$  нечетное, то и  $A$  нечетное). Приведем несколько примеров.

Таблица 3.

Элем.	$Z$	$A$	Част. альфа ( $n$ )	Протонов ( $p$ )	Свобод. электр. ( $x$ )
<i>N</i>	7	14	3	2	1
<i>Na</i>	11	23	5	3	2
<i>P</i>	15	31	7	3	2
<i>Si</i>	20	40	10	0	0
<i>Ra</i>	88	226	56	2	26
<i>U</i>	92	238	59	2	28

Неоднократно высказывалась мысль, что  $n$  частиц альфа скучены вместе, образуя как бы центральное ядро ядра, при чем их расстояния друг от друга, а также протонов от центрального ядра таково, что они взаимно не отталкиваются, но притягиваются. Американский ученый В. Д. Гаркинс (W. D. Harkins) изучал вопрос о том, какие элементы встречаются чаще всего в земной коре и в метеоритах, полагая, что эти элементы должны обладать особенно устойчивым строением ядра. Оказалось, что 99% всей массы составлены из элементов, атомный вес которых не превышает 26 (железа); все наиболее распространенные элементы имеют четный атомный вес. Особенно же распространены элементы, атомный вес которых нацело делится на 4, и следовательно в атомном ядре совершенно отсутствуют свободные протоны, а число свободных электронов равно  $1/2 (A-Z)$ , как видно из формулы (7), в которой следует принять  $p=0$ . Интересные взгляды высказала выдающаяся немецкая ученая Л. Мейтнер (Lise Meitner). Она полагает, что те  $x$  электронов в ядре, которые мы назвали свободными и которые находятся в немалом количестве только в элементах двух последних периодов, в действительности все не свободны, но присоединены по два снаружи к частицам альфа и по одному к свободным протонам, превращая их в нейтральные атомы гелия или водорода. Числа таблицы 3 показывают, что только  $k$  части имеющих в ядре частиц альфа могут присоединиться по 2 электрона. Для ядра урана Л. Мейтнер полагает, что из  $x=28$  электронов 2 присоединены к двум свободным протонам, а остальные 26 к 13 частицам альфа. Осталь-

ные  $59 - 13 = 46$  частиц альфа остаются без изменения. Понятно, что эти последние как раз нейтрализуются (для всего атома) теми 92 электронами, которые окружают ядро атома урана. Эти взгляды Л. Мейтнер встретили, однако, много возражений. Новые взгляды на строение атома стал высказывать Резерфорд, начиная с 1927 г. Он полагает, что в центре ядра находится весьма плотная масса, которая заряжена положительно; ее радиус не превышает  $10^{-12}$  см. Вокруг этого центра, в области до  $1,5 \cdot 10^{-12}$  см, вращаются главным образом электроны. Далее, примерно до  $6 \cdot 10^{-12}$  см, вращаются нейтральные частицы альфа, т.е. атомы гелия. Однако, два внешних электрона находятся к ним гораздо ближе, чем в обыкновенном нейтральном атоме гелия, так как в противном случае они были бы сорваны притяжением центральной массы.

Важное значение имеет ныне вопрос о быстром вращательном движении всего ядра атома. Допущение такого движения дало возможность объяснить так называемую сверхтонкую структуру некоторых спектральных линий. — Начиная с 1928 года, стали появляться замечательные теоретические исследования Г. А. Гамова (Ленинград), относящиеся, прежде всего, к вопросу о возможности вылета частицы альфа из ядра радиоактивного атома. Переход такой частицы из области притяжения ядром в область отталкивания казался до этих работ совершенно непонятным. Исследования Г. А. Гамова дали всему вопросу о строении ядра новое направление; однако, для общедоступного изложения результатов этих очень сложных исследований еще не настало время (Г. А. Гамов, „Атомное ядро и радиоактивность“, 1930).

За последнее время физика обогатилась новыми открытиями, о которых скажем несколько слов.

I. Нейтроны. Боте и Беккер (Bothe, Becker) еще в 1930 г. открыли, что бериллий под ударами частиц альфа испускает лучи, обладающие огромной проникающей способностью. Чедвик (Chadwick) первый высказал мысль, что эти лучи состоят из потока ней-

тронов, т.е. соединений одного протона и одного электрона. Их масса равна массе атома водорода, но их заряд равен нулю, вследствие чего они не подвергаются никаким силам со стороны атомного ядра. Частица альфа застревает в атоме бериллия, при чем испускается нейтрон и остается атом углерода, согласно формуле  $Be(9) + \alpha(4) = \text{нейтрон}(1) + C(12)$ . Здесь один элемент (Be) превращается в другой (C). — Бор превращается в азот:  $B(11) + \alpha(4) = \text{нейтрон}(1) + N(14)$ .

II. Позитрон. Блекетт и Оккиалини (Blackett, Occhialini) в Англии и Эндерсон (C. D. Anderson) в Америке открыли положительные электроны; они отличаются от протонов тем, что их масса в 1.840 раз меньше массы протона. Заряды протона и позитрона одинаковые. Позитроны вырываются из различных атомов под влиянием космических лучей.

III. Быстрые протоны. Коккрофт и Уолтон (Cockroft, Walton) в Англии получили тонкие потоки весьма быстрых протонов. Ударяя в атом лития и застревая в его ядре, они раздробляют ядро; при чем получаются два атома гелия по формуле:  $Li(7) + H(1) = 2 He(4)$ . Фтор распадается на гелий и кислород:  $F(19) + H(1) = He(4) + O(16)$ . Алюминий дает гелий и магний:  $Al(24) + H(1) = He(4) + Mg(24)$ . После Коккрофта и Уолтона еще ряд ученых получил потоки быстрых протонов. Вопрос о раздроблении атомного ядра стоит ныне в центре внимания физиков-экспериментаторов.

О. Хвольсон.

**Электроны**, см. *электронная теория*.

**Электропередача**, см. *электротехника*.

**Электропроводность**, см. *электропричество*, стр. 53 сл.

**Электросварка**, см. *резка и сварка металлов*, XXXVI, ч. 1, 302/03.

**Электроскоп**, см. *электропричество*, стр. 28.

**Электросталь**, см. XLI, ч. 4, прил. сталь, 15; ср. *электротехника*.

**Электростатика**, см. *электропричество*, стр. 9 сл.

**Электротерапия**, в самом обширном смысле—всякое применение элект-

ричества с лечебной целью. Истоки лечебного применения электричества восходят в глубокое прошлое. Существуют предания, что еще в мифические времена негры Западной Африки прибегали к использованию природных источников электричества, помещая больных в пруды, где водились электрические сомы (*malapterus electricus*), или привязывая последних к большим частям тела. Затем, уже древним грекам были известны электрические действия янтаря (о чем имеются указания у Скрибония Ларга, Плиния, Диоскорида и др.). Пережитками этого представления о лечебном действии янтаря служит ношение на шею при зобе и базедовой болезни янтарных ожерелий еще и в настоящее время у некоторых восточных народов. Но настоящая Э. началась лишь после великих открытий Гальвани, нашедшего способ получения постоянного тока (1785), названного гальваническим, и Фарадея, открывшего (1831) прерывистый, так наз. фарадический ток. Из физиологических лабораторий электрический ток вскоре же был перенесен в клинику. Знаменитейшим врачом того времени (Гуфеланд, Рейль, Зоммеринг, Аугустин и др.) он казался столь удивительной силой, что от него ожидали исцеления от самых разнообразных заболеваний. Но именно потому, что электрический ток стали применять при таких заболеваниях (напр., катарактах), при которых он не мог быть полезным, первоначальное увлечение им сменилось разочарованием. И только со времени исследований Дюшена во Франции (1849—1850), Ремака в Германии (1856), Бреннера в России (1868—1869) Э. вновь проникла в клинику. Ее введению в клинику много содействовали также Эрб и Дюбуа-Реймон.

Новый этап в истории Э. начался со времени открытия Тесла токов высокого напряжения, примененных для целей лечения впервые д'Арсонвалем, и опытов Брунса (1870), Рихардсона и др. над использованием электрического тока для введения в ткани через кожу различных лекарственных веществ (антипирина, иода, салицилового натрия и т. п.), откуда метод получил название пинтофореза.

Э. в значительной мере развивалась эмпирическим путем, и до настоящего времени различные модификации лечебного применения электрического тока не нашли еще достаточно убедительного физиологического обоснования. Многие врачи поэтому вообще отвергают непосредственное целебное действие электрического тока (за исключением диатермии и применения гальванического и фарадического токов при лечении периферических параличей\*) и видят в нем лишь средство, действующее на болезненные явления через психику больных (путем внушения). Хотя наиболее блестящий эффект, при надлежащей подготовке больных, электрический ток, в особенности фарадический, дает при психогенных (грубо говоря—внушенных или самовнушенных) отклонениях, напр. истерических параличах, истерических: немоте, слепоте и глухоте или истерических расстройствах кожной чувствительности, но крайностью было бы отвергать и непосредственное действие электрического тока, как физического агента, при невралгиях и параличах, зависящих от заболевания периферических нервов.

В настоящее время в Э. применяются следующие виды электрического тока: 1) токи низкого напряжения (постоянный, иначе гальванический) и переменный (иначе фарадический), 2) токи высокого напряжения (диатермия и токи д'Арсонваля) и 3) статическое электричество.

*Гальванизация.* Применяемый при ней электрический ток получается или от гальванических элементов (Грене, Лекланше и др., см. XII, 434 сл.), или от аккумуляторов и динамомашин постоянного тока. В последнее время гальванические элементы постепенно вытесняются специальными аппаратами (пантостатами и мультостатами), питающимися токами от осветительной сети. Ток, полученный от одного из вышеупомянутых источников, подводится к телу больного с помощью металлических проводов, заканчивающихся электродами. Характерную особенность гальванического тока составляет по-

\* Зависящих от повреждения периферических нервов и двигательных нервных клеток спинного мозга.

стоянство его направления и напряжения. Воздействуя на ткани, он вызывает движение ионов тканевых жидкостей от одного электрода к другому, тем самым влияя на клеточный и тканевой обмен. Действие гальванического тока зависит, гл. обр., от колебаний его интенсивности, и оно тем сильнее, чем больше сила тока. Действуя на двигательный нерв или на мышцу, он вызывает сокращение последней, на чувствительный нерв — ощущение покалывания, переходящее при достаточной большой силе тока в ощущение болезненности. В местах приложения к коже электродов появляется гиперемия (покраснение), которая держится некоторое время и по прекращении тока, и местное повышение температуры. Общим действием, — напр., на общий обмен веществ, — местно примененный гальванический ток, по видимому, не обладает, но при достаточно большой интенсивности он может рефлекторным путем (через раздражение чувствительных нервов кожи) влиять на глубоко лежащие органы, напр. на сердце. Гальванизация осуществляется на практике в трех формах: стабильная гальванизация, лябильная и прерывистая. При стабильной гальванизации электроды во все время прохождения тока остаются на одном и том же месте. При лябильной гальванизации один электрод сохраняет постоянное положение, вторым же производят непрерывное движение по коже (обычно этому электроду придается форму вращающегося валика); при прерывистой гальванизации устройство специального электрода позволяет, не снимая его с кожи, включать и выключать ток. Стабильная гальванизация является довольно хорошей болеутоляющей процедурой. Она применяется при невралгиях, невритах, мышечных болях, при некоторых расстройствах функции периферических сосудов (спазмах), трофических расстройствах, базедовой болезни, неврастении и т. п. Лябильная гальванизация применяется, гл. обр., при параличах мышц периферического происхождения; впрочем, в последнее время она все больше и больше вытесняется прерывистой (ритмированной) гальванизаци-

ей, позволяющей упражнять каждую мышцу в отдельности. Длительность гальванизации — 5-8 мин., реже, при некоторых заболеваниях — 15-20 мин. Отдельные сеансы повторяются обычно через день.

*Фарадизация.* Фарадический ток получается от индукционной катушки, напр. Дрюба-Реймона, или от пангостата или мультистата. Колебания направления тока достигают, примерно, 50 в секунду. В противоположность гальваническому току, при прохождении которого через ткани или растворы солей ионы перемещаются в направлении от одного электрода к другому, при прохождении фарадического тока ионы не перемещаются, но совершают колебательные, маятникообразные движения около некоторой неподвижной точки. На мышцы и двигательные нервы фарадический ток действует подобно гальваническому, т. е. вызывает сокращение мышцы. Чувствительные нервы фарадический ток раздражает более сильно, чем гальванический. В противоположность гальваническому току, действующему возбуждающим образом только в моменты включения или выключения тока, а также при быстром колебании его интенсивности, фарадический ток действует в течение всего времени своего прохождения. В мышце, поэтому, он вызывает длительное тетаническое сокращение. Фарадический ток вызывает спазм периферических сосудов, находящихся в сфере его действия. На сосуды и органы, расположенные в глубине тела, он действует рефлекторно. Фарадический ток, подобно гальваническому, может применяться стабильно, лябильно и ритмированно. Лябильная фарадизация в качестве сильного отвлекающего средства применяется при невралгиях, миалгиях и некоторых других болезненных состояниях. При лечении вялых параличей и мышечной слабости она в последнее время вытесняется ритмированной фарадизацией. Применяется она также при неврастении и истерии, но в этих случаях преимущественно в качестве психотерапевтического средства. Стабильной фарадизацией пользуются, гл. обр., для повышения тонуса внутренних органов



например: мочевого пузыря, желудка, кишек, матки и т. п. Длительность и частота сеансов фарадизации те же, что и при гальванизации.

*Гидроэлектрические ванны* применяются в двух видах: полные электрические ванны и четырех-камерные электрические ванны. При полных электрических ваннах ток проводится на тело через всю воду, заполняющую ванну. В воду ток поступает через два или больше пластинчатых электрода. Ванны делаются из плохо проводящих электричество материалов (дерево, фаянс и т. п.) и хорошо изолируются от пола. Один электрод помещается обычно в ножном, второй в головном конце тела; применение нескольких электродов допускает и иное расположение их. Поступивший в воду ток распространяется равномерно по всей поверхности тела, погруженного в нее. Чем больше эта поверхность, тем большей силы ток может быть применен. Общие электрические ванны допускают возможность введения в человеческое тело токов значительно большей силы, чем какие бы то ни было иные электротерапевтические процедуры; в частности, сила гальванического тока может быть доведена, без вреда для больного, до 100—200 мА. Для общих электрических ванн применяются гальванический ток, фарадический, гальвано-фарадический и синусоидальный трехфазный ток. Синусоидальный ток имеет перед фарадическим то преимущество, что он протекает более равномерно и потому легко переносится в значительно больших количествах. Все же не следует переходить дозу в 20 мА. Продолжительность гидроэлектрических ванн не должна превышать 5—7 мин.; постепенно она может быть доведена до 15 мин. Включение и выключение тока должно совершаться весьма постепенно. При полной гальванической ванне сила тока может быть доведена до 50—200 мА; при фарадической—она доводится до той степени, чтобы пациент лишь ощущал ток, и никоим образом не выше 20 мА. Вода для ванн берется индифферентной (комнатной) температуры. Для усиления лечебного действия в воду иногда прибавляют соль, ароматические травы и т. п.

Лечебное действие переменного тока основывается, гл. обр., на раздражающем воздействии его на кожу и на благотворном влиянии его на сердечно-сосудистую систему. Кровяное давление во время гидроэлектрической ванны повышается, а наполнение кровью периферических сосудов уменьшается; после курса ванн нередко отмечалось уменьшение в объеме расширенного до этого сердца, почему их и относят к процедурам, упражняющим сердце. Ванны с гальваническим током также уменьшают объем периферических сосудов, но менее значительно, чем с фарадическим; при повышенном кровяном давлении (гипертонии) после гальванической ванны иногда наблюдается снижение последнего. Высказывавшееся прежде предположение о влиянии гидроэлектрических ванн на обмен веществ в настоящее время большинством электротерапевтов отвергается; напротив, улучшение сна и общего самочувствия признается почти всеми. Гидроэлектрическая ванна назначается также при ревматических и подагрических заболеланиях суставов.

*Четырехкамерная ванна* состоит из 4-х небольших фарфоровых ванн, наполненных тепловатой водой: двух для верхних конечностей и двух для нижних. Больной помещается на изолированном сидении и опускает в ванночки обнаженные предплечья и голени. Ток поступает в каждую ванночку через два плоских угольных электрода и с конечностей распространяется на все тело. Четырехкамерные ванны представляют собою общую электризацию. Преимущество их перед гидроэлектрическими ваннами состоит в том, что больному не приходится полностью раздеваться, а перед обычной общей электризацией— в том, что в них можно применять значительно более сильный ток (до 20—30 мА), чем с обыкновенными электродами. Четырехкамерные ванны могут применяться и только для верхних или только для нижних конечностей. Четырехкамерные ванны применяются при лечении различных нервственных состояний, в особенности сопровождающихся неприятными ощущениями в конечностях (ощущения онемения, бегания мурашек, покальва-

ния в кончики пальцев и т. п.), при спазмах сосудов конечностей, писчей судороге и других профессиональных неврозах и невралгиях. Так как четырехкамерная ванна менее резко влияет на сердце, ее следует предпочесть общей электрической ванне при вышеупомянутых заболеваниях у лиц, страдающих пороками сердца. Применение четырехкамерных ванн для целей ионтофореза после исследований Франкгейзера и Ледука в настоящее время оставлено.

**Ионтофорез.** Для введения лекарств применяется гальванический ток. Доказано, что лекарство, введенное в организм путем ионтофореза, частью удерживается в тканях, расположенных под местом приложения электрода, частью же поступает в лимфатические и кровеносные сосуды, разносясь по всему телу. Так, обр., при ионтофорезе представляется возможным действовать не только местно, непосредственно на пораженный очаг, но и на весь организм в целом. Но и лекарственные вещества, фиксированные в тканях, постепенно поступают в общее кровяное русло. Поступление их совершается сравнительно медленно и потому лекарства, введенные в организм путем ионтофореза, задерживаются в нем значительно дольше, чем введенные через рот или в клизмах. В этом обстоятельстве многие врачи видят преимущество ионтофореза перед внутренним приемом лекарств. Для ионтофореза применяются пластинчатые электроды (угольные, свинцовые, цинковые или станиоловые). Участки кожи, на которые накладываются электроды, должны быть хорошо прогреты и очищены от жира и загрязнений. Под электроды помещаются прокладки из бумаги, ваты или марли, смоченные в лекарственном растворе. Ионтофорез в настоящее время получил широкое распространение и с успехом применяется при самых разнообразных заболеваниях (воспалениях суставов, бронхиальной астме, сухих плевритах, хронической малярии, недостаточности щитовидной железы, сифилитических поражениях центральной нервной системы, периферических параличах лицевого нерва, невралгиях тройничного нерва, воспалениях периферических

нервов, внутрибрюшных сращениях, волчанке и т. п.). Длительность сеансов до 10—15 м., сила тока от 2—3 до 10 мА; частота через 1—2 дня.

**Токи большой частоты** применяются в форме диатермии и д'арсонвализации. Сущность *диатермии* заключается в том, что электрический ток очень большой частоты (от 100.000 до 1.000.000 перемен в секунду) и значительной интенсивности вызывает повышенное теплообразование в глубоких тканях животного организма, так наз. теплоту сопротивления. Стимулирование теплообразования составляет наиболее характерную особенность диатермии, по сравнению с которым действие самого тока отходит далеко на задний план, и поэтому диатермию надлежит причислить к термотерапевтическим процедурам. Но от обычных термотерапевтических процедур диатермия отличается тем, что в то время как при последних тепло приносится в организм извне, при диатермии оно зарождается в глубоких тканях самого организма. Количество развиваемого тепла может быть весьма значительным. Оно зависит от размеров прогреваемой части тела и длительности применения прогревания. При общей диатермии и при прогревании обширных областей температура тела может подняться до 38—39°; при частичной — на несколько десятых градуса. Вызывая расслабление гладких мышечных волокон сосудов, диатермия приводит к активной гиперемии, т. е. расширению сосудов и, как результату егс, к усиленному приливу крови к прогреваемой части тела. Но расслабляющее воздействие диатермии на гладкие мышечные волокна не ограничивается только сосудами; в одинаковой степени оно касается и гладких мышц внутренних органов. Вызываемое диатермией тепло оказывает стимулирующее (возбуждающее) воздействие на самые клетки, повышая их жизнедеятельность. Так, диатермия селезенки сопровождается повышением в крови числа белых и красных кровяных шариков, количества гемоглобина и антител и т. п. Ей присущ также и хороший болеутоляющий эффект.

Терапевтическое применение диатермии зиждется гл. обр. на ее гипе-

ремизирующем, тепловом, противоспазматическом и болеутоляющем действии. Она назначается, поэтому, во всех тех случаях, где желательно оживить тканевые процессы, рассасывание воспалительных процессов (различного рода суставные заболевания хронического и подострого характера: ревматические, травматические, подагрические, гонорройные, мышечный ревматизм, воспалительные выпоты женских половых органов и в плевральной полости; воспалительные и постоперационные сращения между внутренними органами и т. п.), уменьшить спазм сосудов (сосудодвигательные расстройства спазматического характера на конечностях, перемежающаяся хромота, болезнь Рено, грудная жаба и др.), ослабить спазм гладкой мускулатуры внутренних органов (спастический колит, спазм привратника и т. п.) или ослабить болевые ощущения. Противопоказуется диатермия при всех острых инфекционных процессах и острых воспалениях нервов, при туберкулезных поражениях суставов и в тех случаях, где имеется склонность к кровотечению, как, напр., при язвах желудка или двенадцатиперстной кишки.

Ток получается от специальных аппаратов (в последние годы приготовление их освоено советскими заводами) и проводится в тело при помощи специальных электродов. Обыкновенно применяются гибкие металлические пластинки. Электроды должны быть хорошо прилажены и на всем своем протяжении плотно прилегать к поверхности тела. При поперечном прогревании какого-либо участка туловища или конечности электроды располагаются друг против друга, при продольном — один над другим. Для специальных целей (диатермия женских половых органов, прямой кишки и т. п.) один из электродов, вводимый в эти органы, делается плотным и ему при дается яйцевидная или цилиндрическая форма. При дозировке опираются как на показания амперметра, так и на собственные ощущения больного (ощущение тепла). Обычно последнее появляется при силе тока в 0,2—0,8—1,0 А. При местных диатермиях не следует

переходить 0,8 амп., при общих — 2-2,5 амп. Продолжительность сеанса от 15 мин. (в начале) до 25—30 мин. Частота сеансов: при прогревании небольших областей — ежедневно, более обширных — через день. Общее число сеансов зависит от характера заболевания, в среднем 12—15, и лишь в упорных случаях 20—25. Отсутствие эффекта после такого числа сеансов указывает на то, что данный случай недоступен воздействию диатермии. Среди всех электротерапевтических процедур диатермия является наиболее эффективной и физиологически наиболее обоснованной процедурой. В последнее время она получила широкое и вполне оправданное распространение.

При *д'арсонвализации* используются токи столь же большой частоты, как и при диатермии, но огромного напряжения (в 50.000—200.000 вольт) и незначительной силы. Обычно применяется общая и местная д'арсонвализация. При общей больной помещается (стоя или сидя) в большой соленоид, по которому проходит ток. Так. обр. больной находится собственно в электромагнитном поле. Сила тока, пробегающего по соленоиду, равна 0,5—1,0 амперу, а напряжение его достигает 50.000—100.000 вольт. Небольшая лампочка, соединенная с проволокой соленоида, загорается, а при поднесении к нему металлического предмета может быть получена искра. На больных, страдающих истерическими расстройствами, демонстрация этого явления может произвести большой психотерапевтический эффект. Длительность сеанса, повторяемого не чаще, как через день, — 10-15 минут; продолжительность лечения — 12-20 сеансов. При местной д'арсонвализации ток при помощи специальных электродов переносится на ограниченные участки поверхности тела. Перенос производится двумя способами: тихими разрядами с помощью эффлювиевых электродов, состоящих из множества металлических острий, помещенных на шарообразной или плоской основе. Электрод подносится, но не прикасается к поверхности тела, и разряды тока происходят через воздух. В темноте кончики острий светятся синеватым огнем. Разряды воспри-

нимаются больным как легкое щекотание. Или пользуются конденсаторными электродами, состоящими из металлического или графитового стержня, наружная обкладка которых сделана из стекла. Конденсаторные электроды или плотно прикладываются к поверхности тела, — в этом случае искры проскакивают только по краям электрода, больной не испытывает никакого ощущения и только при длительном воздействии легкую теплоту, — или же электрод помещается на некотором расстоянии от поверхности тела. Длина получаемых при этом искр зависит от напряжения питающего тока и удаленности электрода от тела. Искровые разряды вызывают ощущение покалывания или болезненного жжения; при сильных напряжениях можно вызвать пузыри. Длительность сеанса местной д'арсонвализации — 5-10 минут.

Вопрос о том, почему токи столь высокого напряжения, как 100.000 вольт и больше, переносятся организмом без вреда, в то время как токи напряжением в 1—2.000 вольт действуют смертельно, в настоящее время объясняется тем, что при столь частой перемене направления тока (50.000—200.000 в секунду) перемещение ионов, лежащее в основе раздражающего действия электрического тока, не может проявиться: ионы не успевают переместиться, совершая самое большее незначительные колебания. Терапевтическое действие общей д'арсонвализации сводят к понижению ненормально повышенного кровяного давления. Однако, это может быть достигнуто лишь в том случае, если сосуды сохранили свою эластичность (идиопатические и токсические гипертонии); при артериосклеротической гипертонии действие общей д'арсонвализации ничтожно. В последнее время высказывались взгляды, что понижающее кровяное давление действие общей д'арсонвализации обусловлено не самим током, а газами, образующимися при его прохождении и вдыхаемыми больным. Имеет значение также психотерапевтическое действие общей д'арсонвализации, особенно при надлежщей психотерапевтической под-

готовке больных. Терапевтическое действие д'арсонвализации зависит: при легких искрах от успокаивающего влияния их на чувствительные кожные нервы; при более значительных — от отвлекающего воздействия на болезненные состояния нервов, залегающих в более глуболежащих тканях, рефлекторным путем, через раздражение кожных чувствительных нервных окончаний. В этом последнем случае местная д'арсонвализация сопровождается гиперемией кожи и субъективным ощущением теплоты. В соответствии с изложенным физиологическим действием местная (мягкая) д'арсонвализация назначается при различного рода невралгиях, табетических стреляющих болях, в особенности же при парестезиях; она дает также хороший эффект при зуде, некоторых формах экземы, нарушениях потовыделения (ослаблении его), озноблениях, сосудодвигательных расстройствах с характером спазма сосудов. Более энергичная д'арсонвализация применяется с успехом при более глубоко расположенных источниках болей — артритах болях, а также при болях в области сердца. При ряде функциональных расстройств, — напр., истерических парезах и параличах, истерических расстройствах чувствительности, — сильные искры дают обычно очень хороший терапевтический эффект чисто суггестивно.

*Франклиннизация* (статическое электричество). Статическое электричество получается при трении о полоски фольги, наклеенные на стеклянные вращающиеся в противоположном направлении круги, мягких металлических щеток. При этом возникает положительное и отрицательное электричество, накапливающиеся на специальных шарах, соединенных с вышеуказанными щеточками. Статическое электричество может применяться в форме общей франклиннизации, обычно назыв. статическим душем, или местной франклиннизации. Последняя применяется либо в форме ветерка, либо раздражений искрами, возникающими при поднесении электродов, усаженных остриями, к поверхности тела. Физиологическое влияние статического электричества до настоящего времени не выяснено. Общая

франклинизация находит широкое применение главным образом при функциональных расстройствах нервной системы (истерии, неврастении, травматических неврозах и т. п.), особенно связанных с общей разбитостью, тяжестью в голове, головными болями. Местная франклинизация, специально искрами, с успехом применяется при истерических ослаблениях чувствительности, истерических параличах и контрактурах, миалгиях и т. п. Длительность отдельных сеансов как местной, так и общей франклинизации — 10-15 минут, повторение через 1—2 дня.

#### И. Раздольский.

**Электротехника.** Современная Э., развившаяся на основе чисто физического учения об электричестве (см. ЛII, 9 сл.) и магнетизме (см. XXVII, прил., 579<sup>а</sup> сл.), представляет собою в настоящее время обширную область прикладного знания. Поэтому оказалось необходимым выделить два больших основных раздела: Э. слабых токов и Э. сильных токов. Хотя строгой границы между ними провести невозможно, все же обычно к первому относят технику проволочной и беспроводной связи: телеграфию (см. XLI, ч. 7, 219 сл.), телефонию (см. XLI, ч. 7, 262 сл.) и радио (см. XXXV, 362 сл.), а также сигнализацию и блокировку. Э. сильных токов также распадается на ряд отделов. Здесь прежде всего нужно выделить общие отделы, подводящие базу под все области применения электричества и магнетизма в технике: *теоретические основы Э.*, изучающие техническую интерпретацию физических законов и являющиеся как бы мостом между физикой и техникой; *технику электрических измерений*, включающую в себя приборы и способы измерений и учета как электрической энергии, так и факторов, ее создающих (тока, напряжения и т. д.); *электроматериаловедение*, рассматривающее и изучающее свойства материалов, применяемых в Э., — свойства, иногда резко отличающиеся от свойств обычных материалов; *отдел электрических машин*, рассматривающий аппараты для получения (генерирования), преобразования электрической энергии и превращения ее в механическую. На

основе этих четырех отделов развивается и продолжает бурно расти прикладная Э., включающая в себя отделы: *электростанции и сети, электромоторный привод, Э. в промышленности* (с целым рядом разветвлений), *Э. в сельском хозяйстве; Э. в быту, электрический транспорт, электрическое освещение* и т. д.

I. *Теоретические основы электротехники.* Т. о. э. содержат в себе изложение методов количественного и качественного анализа электромагнитных явлений с точки зрения их технического использования. Т. о. э. пользуются трудами основоположников современного физического учения об электричестве (см. *электричество и магнетизм*). Однако, здесь имеется ряд собственных основных вопросов, разработанных учеными и инженерами: Т. Г. Блеклей („Papers on alternating currents of electricity“, 1880), Ч. Штейнметц (1893), А. Кеннели, Г. Феррарис, Хевисайд, Н. Тесла, М. Доливо-Добровольский, Лакур, Брагштад, Фортецкий и др. Сюда относятся: метод векторных диаграмм, символический метод, метод инверсных диаграмм, метод суперпозиции, теория трехфазного тока, применение рядов Фурье, теория неустановившихся явлений и др.

*Основные понятия: электрический ток и электрическое напряжение.* Согласно воззрениям современной электронной теории, электрический ток представляет собой движение атомов электричества (электронов) с отрицательным зарядом, равным  $\sim 0,16 \cdot 10^{-20}$  кулона. Электроны имеют значительно меньшую массу, чем атомное ядро, и от каждого атома могут быть отщеплены один или несколько электронов. После такого отщепления атом (или группа атомов—молекула), оставаясь заряженным положительно, превращается в положительный ион (атом или молекула ионизируется); наоборот, при увеличении числа электронов получается отрицательная ионизация атома. В нейтральном состоянии число электронов равно числу элементарных положительно заряженных элементов ядра атома (протонов).

Указанный процесс ионизации может сопровождаться и такими явлениями

когда целая группировка молекул, образуя молекулу какого-либо сложного вещества, расщепляется (диссоциируется) на части с избытком и недостатком электронов. Такой случай мы имеем гл. обр. в электролитах (проводящих жидкостях). Установлено, что при этом недостаток электронов получается у молекул металлов и водорода, которые и дают положительно заряженные ионы, называемые исторически ошибочно катионами, так как отлагаются на отрицательном полюсе (катоде) в электролитической ванне (рис. 1). Отрицательно заряженные ионы с избытком электронов называются анионами (направляются к аноду).

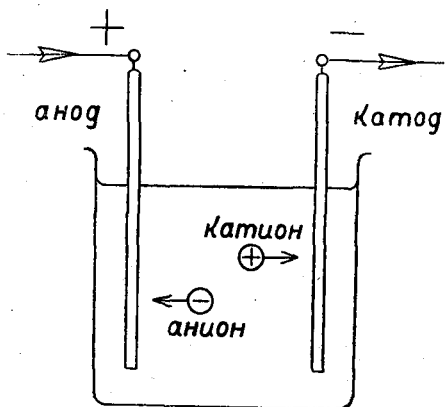


Рис. 1.

Принятое теперь нами направление электрического тока было взято именно из наблюдения над электролитическим выделением металлов. Как известно, применение электричества в промышленности началось с гальваностегии. Оказывается, что движение электронов и отрицательно заряженных ионов идет в направлении, обратном принятому нами направлению электрического тока.

В соответствии с описанным выше электрический ток может получаться лишь тогда, когда его цепь составлена из таких тел, в которых могут образоваться свободные (отщепленные) электроны или молекулярные ионы. При чем эта цепь должна быть замкнута, так как иначе в месте размыкания должны были бы непрерывно накапливаться все большие и большие количества электронов или ионов, не со-

ответствующие действующему в цепи источнику электрического напряжения (источнику энергии). В газах (и парах) указанная ионизация происходит под влиянием естественных и искусственных ионизаторов; сюда относятся: высокая температура, ультрафиолетовые и рентгеновские лучи, радиоактивные излучения, космические лучи. При высоком напряжении эта начальная стадия ионизации переходит в самоионизацию толчком, которая приводит к электрическому разряду в газах по следующим стадиям: тихий разряд искровой и, наконец, дуговой. В жидкостях явление ионизации (ее принято называть электролитической диссоциацией) происходит под влиянием диссоциирующих свойств растворителей. В твердых телах движения ионов не происходит, а могут двигаться лишь отщепленные (свободные) электроны. Поэтому различают ионную проводимость газов, электролитическую проводимость жидкостей (электролитов) и электронную проводимость металлов (проводников, электродов). Существуют тела, в которых не только нет движения ионов, но также и не могут получаться в заметном количестве свободные электроны. Такие тела почти не обладают проводимостью и называются изоляторами. Однако, в них под действием электрического поля происходит электрическая поляризация атомных и молекулярных систем, происходящая гл. обр. за счет смещения орбит движения электронов, и поэтому они все же не остаются электрически инертными и называются диэлектриками. Строго говоря, во всех телах оба эти явления—проводимость и поляризация—происходят одновременно, но только в разной степени.

Для того, чтобы ионы и свободные электроны двигались, недостаточно, однако, одного только их наличия, а необходимо, чтобы они находились под действием электрических сил. К настоящему времени подробно еще не выяснена природа действия этих сил. Можно считать установленным лишь то, что: во-1) это действие связано с электромагнитными свойствами мирового пространства (или особой электромагнитной среды—мирового эфира в этом про-

странстве); во-2) это действие не распространяется мгновенно, а со скоростью порядка скорости света —  $3 \cdot 10^{10}$  см/сек., в зависимости от среды; и, наконец, во-3) что оно происходит от скопления положительных и отрицательных зарядов (недостаток или избыток электронов), при чем это действие передается на любое расстояние. По последнему пункту говорят, что между данными областями среды (областями скопления разноименных зарядов) — электрическими полюсами — действует электрическое напряжение. Причины возникновения таких полюсов разнообразны. В атмосфере, в условиях ионизированного воздуха такие скопления могут получиться на движущихся густых облаках (грозовые явления), на металлических остриях (атмосферные свечения). При прикосновении разных металлов непосредственно или через

теги энергии и соединительные проводники. Все эти элементы могут быть соединены последовательно, параллельно или смешанно (последовательно-параллельно; см. рис. 2).

Между результирующим напряжением  $v$ , действующим в цепи, и силой тока  $i$  имеется простая пропорциональная зависимость, установленная германским физиком Омом и носящая название закона Ома:

$$v = ri.$$

Коэффициент пропорциональности  $r$  Ом назвал электрическим сопротивлением. Действительно, представляя закон Ома в другой форме:

$$i = \frac{v}{r},$$

мы видим, что чем больше  $r$ , тем меньше сила тока  $i$ . Этот простой и в то же время фундаментальный закон является для  $\mathcal{E}$ . в количественном отношении

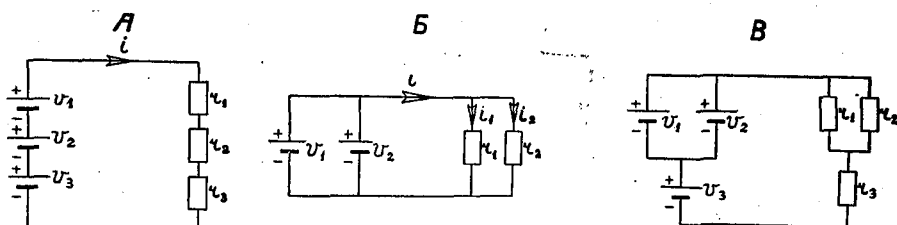


Рис. 2.

электролит получается контактное напряжение из-за явления электронного осмоса (гальванические элементы). При нагревании спаев разных металлов получают электрические полюсы (термоэлементы). Наконец, самые мощные современные электротехнические источники напряжения образуются под влиянием электромагнитной индукции.

*Цепь постоянного (прямого) тока.* Под постоянным током разумеется ток неизменного направления и неизменной силы. В тех случаях, когда хотят обобщить это понятие в смысле только одного неизменного направления, говорят о прямом токе. Прямой ток меняющейся силы называют еще иногда пульсирующим током.

При постоянном токе легче установить основные законы электрического тока. Его цепь должна быть замкнута. В состав цепи входят один или несколько источников энергии, потреби-

очень важным. Оказывается, что электрическое сопротивление каждого проводника зависит в свою очередь от его длины  $l$ , сечения  $q$  и материала:

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

Для металлических проводников  $l$  принято измерять в метрах, а  $q$  — в квадратных миллиметрах. Для жидкостей (электролитов) и то и другое — в сантиметрах и, соответственно, квадратных сантиметрах. Удельное сопротивление  $\rho$  найдено для различных веществ опытом.

Прежде всего закон Ома позволяет установить единицы для измерения основных электротехнических величин: напряжения и силы тока. Согласно приказу ВСНХ СССР от 26/1 1925 г., по представлению Всесоюзного института мер и стандартов (ВИМС), обязательными для всего Союза ССР являются следующие основные единицы:

1. Международный *ампер* есть величина неизменяющегося электрического тока, который отлагает 0,00118 грамм серебра в секунду, проходя через водный раствор азотнокислого серебра. Ампер подразделяется на 1.000 миллиампер или 1.000.000 микроампер.

2. Международный *ом* есть сопротивление, оказываемое неизменяющемуся электрическому току при температуре тающего льда ртутным столбом, имеющим повсюду одинаковое поперечное сечение, длину 106,3 см и массу в 14,4521 гр, что соответствует сечению в 1 мм<sup>2</sup>. Ом подразделяется на 1.000.000 микромов. 1.000.000 ом составляет один мегом.

Международный *вольт* есть электрическое напряжение, которое в проводнике, имеющем сопротивление в один ом, вызывает ток в один ампер. Вольт подразделяется на 1.000 милливольт. 1.000 вольт составляет один киловольт. Нормальный элемент Вестона имеет напряжение, равное 1,0152 вольт.

Электрическое сопротивление зависит еще от температуры проводника по биномиальному закону:

$$r_t = r_0 (1 + \alpha t),$$

где  $\alpha$  — т. наз. температурный коэффициент.

Приводим значения для  $\rho = \frac{r \cdot q}{l}$  в  $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{метр}}$  для некоторых проводников:

	$\rho$ при 0°t	$\alpha$
Медь	$1,54 \cdot 10^{-2}$	0,0045
Серебро	$1,47 \cdot 10^{-2}$	0,004
Алюминий	$2,56 \cdot 10^{-2}$	0,0042
Железо	$9,07 \cdot 10^{-2}$	0,008
Ртуть	$91,3 \cdot 10^{-2}$	0,0003
Никкель	$12,30 \cdot 10^{-2}$	0,006

С помощью закона Ома можно весьма просто изучать явления лишь в чисто последовательных цепях (рис. 2А). В этом случае сопротивления отдельных проводников, являющихся элементами замкнутой цепи, просто складываются, при чем в каждом таком отдельном сопротивлении происходит падение напряжения:  $e = ir$ .

В случае параллельного (рис. 2Б) и смешанного (рис. 2В) соединения или вообще в случае разветвленной цепи задачу о токораспределении можно ре-

шить, лишь пользуясь следующими двумя правилами Кирхгофа.

1-е правило: во всякой точке разветвления (и вообще во всякой точке) электрической цепи сумма токов притекающих равна сумме токов утекающих.

2-е правило: во всяком замкнутом контуре разветвленной цепи алгебраическая сумма действующих напряжений источников равна такой же сумме падений напряжений на отдельных участках этого контура.

Отсюда, например, вытекает, что в параллельных ветвях (1) и (2) (фиг. 2) токи будут обратно пропорциональны сопротивлениям. Действительно, по 2-му правилу:  $0 = i_1 r_1 - i_2 r_2$ . А стало быть

$i_2 r_2 = i_1 r_1$  или  $\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}$ . Для нескольких параллельных ветвей:

$i_n = \frac{1}{r_n}$  или  $i_n r_n = \text{пост.}$  Так как, согласно первого правила,  $I = i_1 + i_2$ , то эквивалентное сопротивление двух параллельных ветвей получится следующим образом:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \text{ или } R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}.$$

На основании указанных правил возможно задачу о токораспределении решить в любом случае. Для этого надо составить ур-ия напряжений по контурам и ур-ия токов по узловым точкам так, чтобы общее количество ур-ий соответствовало числу неизвестных. Совместное решение этой системы ур-ий дает нужные результаты.

Иногда удобно пользоваться методом суперпозиции (наложения) действующих напряжений (электродвижущих сил), вытекающим из принципа независимости действия электрических сил. По этому методу находят в отдельных ветвях те слагающие тока, которые получились бы, если бы по всей цепи действовал лишь один из группы источников напряжения, а остальные были бы представлены лишь своими внутренними сопротивлениями.

При решении задач о параллельных соединениях пользуются понятием о проводимости, как величине обратной сопротивлению:

$$g = \frac{1}{r}.$$



Проводимости параллельных ветвей просто складываются:

$$G = \sum g_n,$$

в то время как в последовательном соединении складываются сопротивления:

$$r = \sum r_n.$$

Единицей для измерения проводимостей служит МО—проводимость одного ома.

Как будет установлено впоследствии, в разделе об электрическом поле, электрическая энергия может выражаться через произведение силы тока на напряжение и на время:

$$A = V \cdot I \cdot t.$$

Таким выражением энергии, дающим количество работы, нельзя, однако, полностью охарактеризовать энергетические возможности какого-либо устройства. Поэтому введено понятие о мощности, представляющей собой энергию в 1 сек.

$$P = \frac{A}{t} = V \cdot I.$$

Единицей для измерения энергии (работы) мог бы служить джоуль, равный вольтамперсек. и в то же время работе силы в  $\frac{1}{9,81} = 0,102$  кг на протяжении одного м. Если принять во внимание, что по стандарту ОСТ 169 рекомендуемой в Союзе единицей силы является один стен (совершенно — ст), равный силе, сообщаемой массе в одну тонну ускорение в один м в сек.<sup>2</sup> и равный 102 кг силы, то джоуль может быть представлен как 0,001 стм (1 кдж = = 1 стм). Однако, в практической Э. поступают иначе, а именно: пользуются единицей, установленной для измерения мощности — 1 ваттом. 1 ватт равен мощности какого-либо устройства, в котором преобразуется 1 джоуль энергии в сек. Отсюда энергия может измеряться в ваттсекундах или производных от этой единицы: гектоваттчасах, киловаттчасах, мегаваттчасах (гвч, квч, мвч). Гаусс впервые показал, что можно построить систему взаимно-связанных единиц, названную им абсолютной. В этой системе за единицу работы принят эрг—работа 1 динь силы на протяжении 1 см. Оказалось далее, что

10<sup>7</sup> эрг может быть принято равным вышеупомянутой единице—джоулю.

В одной лощ. силе содержится 736 ватт или 736  $\frac{\text{джоулей}}{\text{сек.}}$ , а в одном кгм — 9,81 джоулей.

Указанное выше выражение энергии может быть с помощью закона Ома преобразовано следующим образом:

$$A = VIt = I^2 r It = I^2 r t.$$

В таком виде получается закон Джоуля-Ленца, найденный ими на опыте с получением тепла от электрического тока. Действительно, тепло выделяется во всех случаях, когда по проводнику течет эл. ток. Это приводит к необходимости рассчитывать провода на нагревание, при чем основной величиной, определяющей этот нагрев, является т. наз. плотность тока, т.-е. число ампер, приходящееся на 1 кв. мм сеч. провода. Выделяющееся тепло можно подсчитать еще и следующим образом:

$$I^2 r t = I^2 \rho \frac{l}{q} t = \left(\frac{I}{q}\right)^2 \rho l q t = j^2 \rho v.$$

Здесь  $j$ —плотность тока;  $\rho$ —удельное сопр.: для меди  $\frac{1}{57}$ , а в нагретом состоянии около  $\frac{1}{48}$ ;  $v$ —объем в см<sup>3</sup>.

Отсюда в медном проводе выделяется энергии в сек. в ваттах на 1 кг:

$$j^2 \cdot \frac{1000}{48 \cdot 8,9} \cong 2,5 j^2$$

(8,9—уд. вес меди). Это тепло отдается проводом в окружающую среду по ур-ю:

$$I^2 r t = \alpha \tau o t;$$

здесь  $\alpha$ —коэфф. теплоотдачи;  $\tau$ —превышение температуры проводника;  $o$ —поверхность охлаждения (для цил. пров.  $o = 10 \cdot \pi d l$  см<sup>2</sup>;  $d$ —диам. пров. в мм). Следовательно:

$$j^2 \rho l q t = \alpha \cdot \tau \cdot 10 \pi d l t$$

$$\text{или} \quad \tau = j^2 \frac{\rho \cdot 10 q}{\alpha \cdot \pi d} \cong 0,8 j^2 \frac{d}{\alpha}.$$

Как показывает опыт, для того, чтобы превышение температуры проводов не превосходило 15° С, необходимо, чтобы плотность тока не была больше величины порядка  $2 \frac{\text{амп.}}{\text{мм}^2}$ . Естественно, что в нагревательных приборах эта плотность тока берется соответственно больше.

Провода должны быть рассчитаны также на падение напряжения  $e = Ir$ . Обыкновенно это падение напряжения задается в процентах от полного напряжения сети ( $e\%$ ) и равно 3—5 до 10 %.

Тогда:

$$e\% = \frac{Ir}{V} 100 = \frac{I \cdot 2l}{k \cdot q \cdot V} 100.$$

Отсюда  $q = \frac{200 \cdot I \cdot l}{k \cdot e\% \cdot V}$  или иначе

$$q = \frac{200 \cdot V \cdot I l}{k \cdot e\% \cdot V^2} = \frac{200 P \cdot l}{k \cdot e\% \cdot V^2}.$$

**Электрическое поле.** Если цепь электрического тока будет разомкнута, оканчиваясь, например, двумя параллельными металлическими пластинками (рис. 3), то под действием электрического

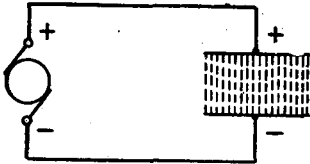


Рис. 3.

вообще во всем окружающем эту цепь пространстве) установится электрическое поле, т. е. в пространстве между ними будут действовать электрические силы. Это обнаруживается при помощи испытательного заряженного тела, которое получает стремление двигаться в этом поле. Электрическое поле получится между пластинками также и тогда, когда они будут совсем отсоединены от источника и на них останутся разноименные заряды. Поле можно возбудить и постепенным накоплением зарядов на его границах путем механического переноса их от полюсов источника или использования явления электростатической индукции. На этом принципе основано действие электростатических машин. Это дает право считать, что электрическое поле вполне обуславливается электрическими зарядами, взятыми даже отдельно. Электрическое поле приобретает большое практическое значение в двух случаях: при высоких напряжениях и при высоких частотах изменения тока (радиотехника).

Основным законом, на котором построены все количественные соотношения в эл. поле, является опытный закон французского физика Кулона, обобщаемый затем теоремой Гаусса и, наконец, понятием о потенциале поля. Согласно этому закону, два заряженных тела очень малых размеров по сравнению с расстоянием между ними (два точечных заряда), помещенные в однородную среду, испытывают взаимодействие с силой  $F$ , пропорциональной самим зарядам  $q_1$  и  $q_2$  и обратно пропорциональной квадрату расстояния  $r$ :

$$F = \frac{q_1 q_2}{\epsilon \cdot r^2},$$

где  $\epsilon$  — т. наз. диэлектрический коэффициент среды. Этот закон позволяет в нужном случае найти основную величину, характеризующую эл. поле в какой-либо точке, т. наз. силу поля или, иначе, его напряженность  $\mathcal{E}$ .

Действительно, давая определение напряженности поля в данной точке, как силе, которую испытывает положительный единичный испытательный заряд, помещенный в эту точку поля, мы будем в состоянии в любом случае рассмотреть источник этого поля с точки зрения элементарных точечных зарядов и составить сумму всех элементарных действий по какому-либо направлению. Так что:

$$\vec{\mathcal{E}}_\alpha = \int d\vec{\mathcal{E}}_\alpha = \int \frac{d\vec{F}_\alpha}{q_2} = \int_0^{\alpha} \frac{dq_1}{\epsilon r^2} \cos \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между каждой элементарной силой и выбранным направлением. Так, напр., можно найти, что напряженность поля очень длинной равномерно заряженной прямолинейной оси в точках, отстоящих от этой оси на расстояние  $r$  в направлении, перпендикулярном к ней, будет равна

$$\mathcal{E} = \frac{2q}{\epsilon r},$$

где  $q$  — плотность заряда оси на 1 пог. см. Естественно, что при этом надо условиться о единицах для измерения. Как будет подробнее показано ниже, для  $\mathcal{E}$  напряженность удобнее измерять в единицах некоторой удельной работы в вольт (  $\frac{\text{вольт}}{\text{см}} = \frac{\text{вольт} \times \text{кулон}}{\text{см} \times \text{кулон}}$  ).

Тогда напряженность поля одного точечного заряда выразится так:

$$\mathcal{E} \frac{\text{вольт}}{\text{см}} = 9 \cdot 10^{11} \cdot \frac{q \text{ кул.}}{\epsilon \cdot r^2 \text{ см}^2}$$

Иногда пользуются более простыми приемами нахождения напряженности поля. К таковым относится условное представление о силовых линиях, вдоль которых действуют силы поля и которые являются таким образом траекториями движения в поле испытательных зарядов без инерции. Если принять, что каждой такой силовой линии соответствует единица силы поля, то густота линий на  $1 \text{ см}^2$  может характеризовать напряженность поля в направлении перпендикулярном к этой элементарной плоской площадке в  $1 \text{ см}^2$ , проходящей через данную точку. Пользуясь таким представлением, можно во многих случаях изобразить приближенный спектр поля и оценить, напр., в каком месте поля напряженность будет наибольшей

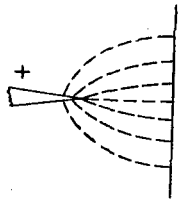


Рис. 4.

будет наибольшей (рис. 4). При вычерчивании таких спектров надо только иметь в виду, что силовые линии заканчиваются у металлических поверхностей перпендикулярно к ним, так как иначе получится тангенциальная составляющая силы поля, при которой неизбежно движение зарядов вдоль этих поверхностей.

В соответствии с представлением о силовых линиях установлена теорема Гаусса, по которой общее число единичных силовых линий (единичных силовых трубок), проходящих через любую замкнутую поверхность, или поток вектора напряженности эл. поля, приходящийся на эту поверхность, равен:

$$N = \frac{4\pi}{\epsilon} \Sigma q,$$

где  $\Sigma q$  — сумма зарядов, заключенных внутри поверхности. Действительно, для частного случая шаровой поверхности радиуса  $r$  с зарядом  $q$  в центре

$$\begin{aligned} N &= \int \mathcal{E} \cdot dS = \int \frac{q}{\epsilon r^2} dS = \\ &= \frac{q}{\epsilon r^2} \int dS = \frac{q}{\epsilon r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{4\pi}{\epsilon} \cdot q. \end{aligned}$$

Теорема Гаусса позволяет очень просто находить напряженность поля в ряде случаев. Так, например, для поля заряженной неограниченной металлической плоскости напряженность поля получится, если подсчитать поток через две плоскости, охватывающие данную:

$$\mathcal{E} = \frac{N}{2S} = \frac{4\pi(\sigma \cdot S)}{\epsilon 2 \cdot S} = \frac{2\pi\sigma}{\epsilon};$$

здесь  $\sigma$  — плотность заряда на  $1 \text{ см}^2$ . Отсюда мы видим, что напряженность поля пластины является одинаковой для всех точек, независимо от расстояния. Такое поле называется равномерным (рис. 3).

Для цилиндрического поля (рис. 5.) подобным же образом

$$\mathcal{E} = \frac{N}{S} = \frac{4\pi(\sigma \cdot 2\pi r l)}{\epsilon 2\pi r l} = \frac{2Q}{\epsilon l} \cdot \frac{1}{r}.$$

Легко также доказать, что внутри заряженного полого металлического

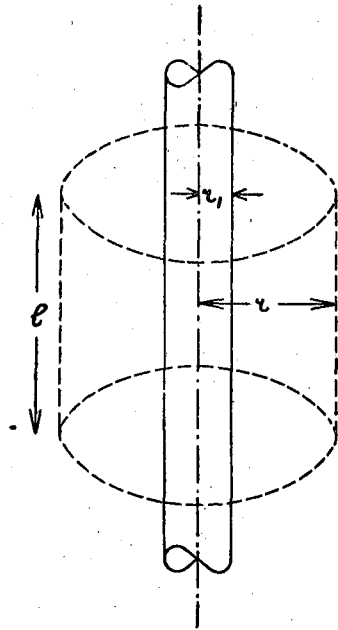


Рис. 5.

шара напряженность поля равна нулю (как говорят — поля нет). Действительно, если рассмотреть какую-либо внутреннюю шаровую поверхность, то не трудно видеть, что сколько линий входит через нее внутрь, столько и должно выходить, т. е. результирующий поток равен нулю. Отсюда же

вытекает, что для электрического поля двух разноименно заряженных параллельных пластин напряженность поля между пластинами равна  $\frac{4\pi\sigma}{\epsilon}$ , а вне их равна нулю (рис. 6).

Наиболее удобным и в то же время более обобщенным определением напря-

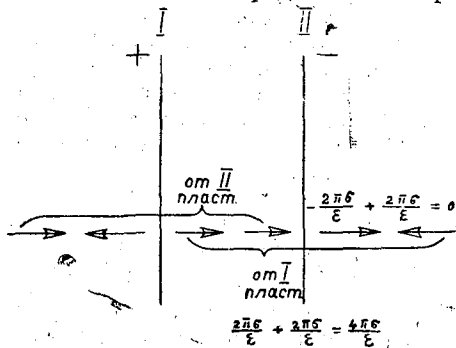


Рис. 6.

женности является определение через изменение (падение) потенциала поля на 1 пог. см по выбранному направлению. Действительно, так как напряженность поля есть сила, то выражение

$\int \mathcal{E} dr$  должно представлять собой работу сил поля при перемещении единичного заряда из одной точки в другую. С другой стороны, в теоретической физике установлено, что поле неподвижных электрических зарядов потенциально, т. е. оно обладает в каждой точке скалярной величиной (потенциалом), которая вполне определяется лишь положением этой точки и пограничными условиями поля и не зависит ни от времени, ни тем более от какого-либо направления отсчета. Сопоставление этих двух положений позволяет, оказывается, принять, что напряженность поля равна градиенту потенциальной функции, взятому с обратным знаком:

$$\vec{\mathcal{E}} = -\frac{dV}{dr} = -\text{grad } V.$$

Это обстоятельство тем более важно, что разность потенциалов по границам поля равна электрическому напряжению между этими границами, которое очень легко измерить приборами. Установив, например, что (см. выше) напря-

женность поля между пластинами есть величина одинаковая и равная  $4\pi\sigma$  для всех точек, мы вправе прямо написать, что

$$\vec{\mathcal{E}} = \frac{V}{d},$$

где  $V$  — напряжение между пластинами, а  $d$  — расстояние между ними в см. Отсюда возникает и единица для измерения напряженности, а именно  $\frac{\text{ВОЛЬТ}}{\text{см}}$ .

Через заряд на пластинах напряженность выражается:

$$\vec{\mathcal{E}} = 9 \cdot 10^{11} \frac{4\pi Q}{\epsilon S}.$$

Для поля между двумя цилиндрами радиусов  $r_2$  и  $r_1$ , выражение напряженности поля через напряжение между границами получится, если воспользоваться ур-нем:

$$V = \int_{r_1}^{r_2} \vec{\mathcal{E}} dr = 9 \cdot 10^{11} \cdot \frac{2Q}{\epsilon l} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = 9 \cdot 10^{11} \frac{2Q}{\epsilon l} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$

Как было показано выше:

$$\vec{\mathcal{E}} = 9 \cdot 10^{11} \cdot \frac{2Q}{\epsilon l} \cdot \frac{1}{r}. \text{ Следовательно:}$$

$$\vec{\mathcal{E}} = \frac{V}{r \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}.$$

Подобным же образом для шарового поля:

$$V = \int_{r_1}^{r_2} \mathcal{E} dr = 9 \cdot 10^{11} \frac{Q}{\epsilon} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = 9 \cdot 10^{11} \frac{Q}{\epsilon} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

или

$$\mathcal{E} = 9 \cdot 10^{11} \frac{Q}{\epsilon r^2} = \frac{V}{r^2 \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}.$$

Для поля между двумя проводниками напряженность в точках на линии, соединяющей оси проводов, равна

$$\mathcal{E} = 9 \cdot 10^{11} \frac{2Q}{\epsilon l} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{d-a} \right) = \frac{V}{2 \ln \frac{d}{r} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{d-a} \right)}.$$

Здесь:  $d$  — расстояние между проводниками,  $r$  — радиус провода и  $a$  — расстояние какой-либо точки до оси одного из проводов. Для исследования поля между проводом и землей служит осо-

бый прием т. наз. зеркального изображения рассматриваемого провода в земле (рис. 7). Поле получается в своей верхней половине совершенно идентичным с действительным, если напряжение между рассматриваемым проводом и фиктивным взять в два раза больше, чем по отношению к земле.

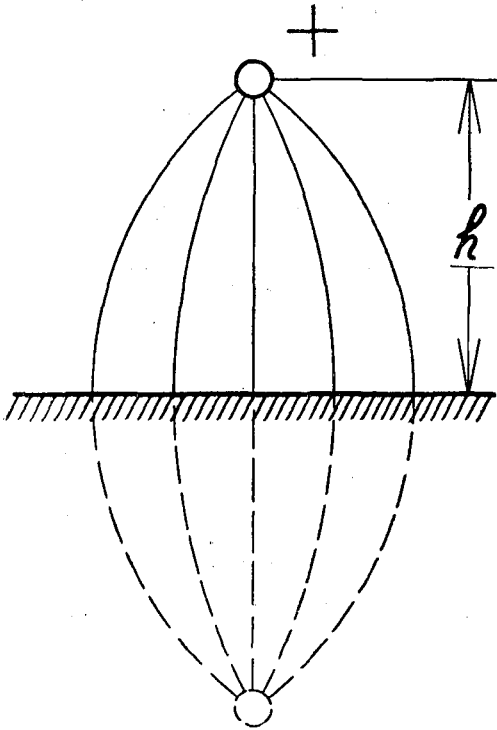


Рис. 7.

Предыдущее выражение представится в следующем виде:

$$\vartheta = \frac{V}{\ln \frac{2h}{r}} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{d-a} \right).$$

При помощи описанных выше соотношений можно найти электрическую емкость конденсаторов, т.е. отношение количества электрического заряда на его обкладках к напряжению:

$$C = \frac{Q}{V}.$$

Если измерять  $Q$  в кулонах, а  $V$  в вольтах, то емкость выразится в единицах емкости — фарадах. Так как эта единица очень велика для практических

целей, то употребляют от нее производные, а именно  $\mu F$  — микрофарад ( $10^{-6}$  фар.) и  $\mu\mu F$  — микромикрофарад ( $10^{-12}$  фар.). Встречается также 1 см емкости, равный  $\frac{1}{9 \cdot 10^{11}}$  фарады ( $1 \mu\mu F = 0,9 \text{ см.}$ ). Так, емкость шарового конденсатора оказывается равна:

$$C = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{\epsilon}{\left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}.$$

Для уединенного шара ( $r_2 = \infty$ ):

$$C = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \epsilon r_1.$$

Для цилиндрического конденсатора:

$$C = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{\epsilon l}{2 \ln \frac{r_2}{r_1}}.$$

Емкость между двумя проводами:

$$C = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{\epsilon l}{4 \ln \frac{d}{r}}.$$

Емкость между проводом и землей:

$$C = \frac{1}{9 \cdot 10^{11}} \cdot \frac{\epsilon l}{2 \ln \frac{2h}{r}}.$$

Конденсаторы могут быть соединены последовательно и параллельно. При этом первое соединение отличается, во 1), тем, что заряд остается неизменным на всех конденсаторах —  $Q = const$  и, во 2), тем, что внешнее напряжение равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах. Отсюда может быть найдена результирующая емкость всего соединения. Действительно, так как

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots, \text{ то } \frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3} + \dots \text{ или } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

При параллельном соединении емкости просто суммируются:  $C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$

При решении электротехнических вопросов помимо задачи о емкости приходится иметь дело также и с расчетом диэлектриков. Как уже было указано, диэлектрики под влиянием электрического поля поляризуются. Влияние такой диэлектрической поляризации обнаруживается простейшим образом тем, что емкость какого-либо конденсатора увеличивается при введении в него диэлектрика. Если конденсатор с диэлектриком зарядить и, отсоединив

предварительно от источника, вывести из него диэлектрик, то, как показывает опыт, напряжение на его пластине увеличится. Последний опыт показывает, что при том же электрическом смещении результирующая напряженность поля при наличии диэлектрика снижается. Исследования показывают, что количественно указанные изменения происходят в отношении диэлектрического коэффициента  $\epsilon$ , что и было уже нами учтено. Из только что описанного опыта с изменением емкости вытекает, между прочим, способ опытного нахождения диэлектрического коэффициента какого-либо диэлектрика.

Явление почти только одной поляризации диэлектриков (изоляторов) при очень незначительном токе объемной и поверхностной проводимости происходит, однако, только до определенного предела напряженности поля. После этого предела возникают новые явления, которые приводят к т. н. электрическому пробое изоляторов. Та напряженность поля, при которой происходит пробой диэлектрика в равномерном электрическом поле, носит название электрической крепости диэлектрика.

Приводим таблицу опытных данных относительно диэл. коэфф. и электрической прочности.

	$\epsilon$	Электрич. прочность
Воздух . . . . .	1,0006	30—40 kV
Парафин . . . . .	2,0	70—270 см
Стекло . . . . .	5—16	180—320
Фарфор . . . . .	6	100—200
Слюда . . . . .	6—8	600—1000
Трансформ. масло .	2,0	90—110
Вода . . . . .	81	—
Бумага . . . . .	3,5—4,5	150—200

В связи с расчетами на электрическую прочность необходимо бывает исследовать эл. поле в каком-либо устройстве с точки зрения определения места с максимальной напряженностью поля. В случае цилиндрического поля этим местом является поверхность внутреннего цилиндра, и максимальная напряженность равна:

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{V}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}}$$

Для поля между двумя проводами место наибольшей напряженности находится у поверхности проводов на линии, соединяющей их оси, при чем

$$\mathcal{E}_{\max} = \frac{V}{2r \ln \frac{d}{r}}$$

В случае сложного диэлектрика необходимо бывает также учесть и то обстоятельство, что напряженность поля зависит от диэлектрического коэффициента. Действительно, из теоремы Гаусса (см. ЛII, 42 сл. и 237):

$$\vec{\mathcal{E}} = \frac{dN}{dS} = \frac{4\pi}{\epsilon} \frac{dq}{dS}$$

Тогда, имея в виду, что свободным зарядам  $q$  на металлической поверхности границ поля будет соответствовать такое же количество поляризованных в силу индукции зарядов в окружающей среде по произвольной замкнутой поверхности (линии индукции

неразрывны), следует принять  $\frac{dq}{dS}$  за электрическое смещение на 1 см<sup>2</sup>, которое обычно обозначается буквой  $D$ , так что  $\mathcal{E} = \frac{4\pi D}{\epsilon}$  или, в практических единицах,  $\mathcal{E} = 9 \cdot 10^{11} \frac{4\pi D}{\epsilon}$ .

В соответствии с этим, напр., в плоском конденсаторе с двумя диэлектриками произойдет перераспределение (рис. 8) напряженности:  $\mathcal{E}_1 : \mathcal{E}_2 = \epsilon_2 : \epsilon_1$ , т. е. в диэлектрике с меньшим  $\epsilon$  напряженность поля будет больше. Поэтому при изготовлении изоляции стараются удалить воздушные прослойки и пузыри.

В заключение главы об электрическом поле рассмотрим вопрос об его энергии. Для этого проследим процесс образования поля. Очевидно, что при этом должно иметь место накопление зарядов на границах поля и в связи с этим по-

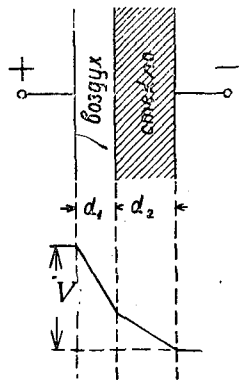


Рис. 8.

вышение напряжения. Тогда в каждой промежуточной стадии образования поля должна затрачиваться элементарная энергия:

$$dA = VdQ = VCdV.$$

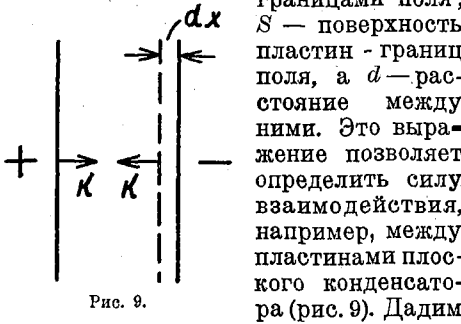
Отсюда полное (конечное) количество энергии

$$A = \frac{CV^2}{2} = \frac{QV}{2} \text{ джоулей.}$$

Если отнести эту энергию к 1 см<sup>3</sup>, то получим:

$$A_1 = \frac{QV}{2v} = \frac{QV}{2Sd} = \frac{D\mathcal{E}}{2} \frac{\text{джоулей}}{\text{см}^3}.$$

Здесь  $v$  — объем, заключенный между



граничами поля;  $S$  — поверхность пластин - границ поля, а  $d$  — расстояние между ними. Это выражение позволяет определить силу взаимодействия, например, между пластинами плоского конденсатора (рис. 9). Дадим

одной из пластин элементарное перемещение  $dx$ , для этого достаточно будет совершить механической работы:  $Kdx$ . Одновременно с этим энергия электрического поля изменится на:  $\frac{D\mathcal{E}}{2} \cdot S \cdot dx$ .

По закону сохранения энергии:

$$K \cdot dx = \frac{D\mathcal{E}}{2} \cdot S \cdot dx,$$

или

$$K = \frac{D\mathcal{E}}{2} \cdot S = \frac{QV}{2d} \text{ дин.}$$

**Магнитное поле.** При движении электрических зарядов в форме ли электрического тока в замкнутой цепи из проводников, в форме ли изменения электрического смещения в диэлектриках или, наконец, в форме движущегося заряженного тела, в окружающем пространстве возникает магнитное поле, т.е. вокруг обнаруживаются магнитные явления, напр. в виде взаимодействия между токами, действия тока на магнитную стрелку.

Исследование магнитного поля ведется примерно по той же схеме, как и в случае электрического поля. Основным понятием служит опять напря-

женность поля, как сила, действующая на единичный элемент тока, помещенный в данную точку.

Основным законом, на котором построены вычисления напряженности магнитного поля, является закон Био-Савара, в более обобщенном виде переходящий в первое ур-ие Максвелла. Согласно этому закону, для того чтобы найти напряженность поля в какой-либо точке, надо разбить цепь тока на элементы длиной  $dl$  (рис. 10) и отыскать выражение вида:

$$dH = k \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin \beta}{r^2},$$

где:  $r$  — расстояние каждого такого элемента до данной точки.  $\beta$  — угол между направлениями  $r$  и  $dl$ , а  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора единиц. Если, как это принято, измерять  $H$  в эрстедтах, силу тока  $I$  в амперах, а  $dl$  и  $r$  в см, то  $k = 0,1$ . Так, для поля тока в прямолинейном проводнике очень большой длины получается напряженность:

$$H = \frac{0,2I}{r_0},$$

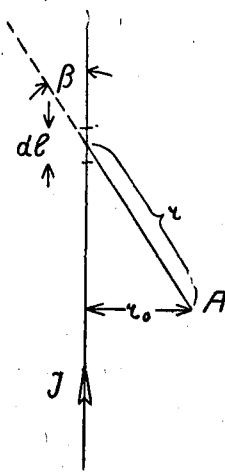
где  $r_0$  — расстояние данной точки от провода. Направление силы поля находится по правилу правого винта. Для кругового тока напряженность поля в центре:

$$H = \frac{0,2\pi I}{r},$$

где  $r$  — радиус круга тока. Максвелл дал ур-ие (1-е ур-ие Максвелла), согласно которому интеграл напряженности магнитного поля по замкнутому контуру (рис. 11) равен току, охватываемому этим контуром:

$$\oint Hdl = I,$$

где  $dl$  — элемент длины контура (не смешивать с  $dl$  в законе Био-Савара). Легко видеть, что отсюда  $H = \frac{dI}{d}$  т.е. напряженность магнитного поля



можно было бы рассматривать с точки зрения градиента магнитного потенциала подобно тому, как это имеет

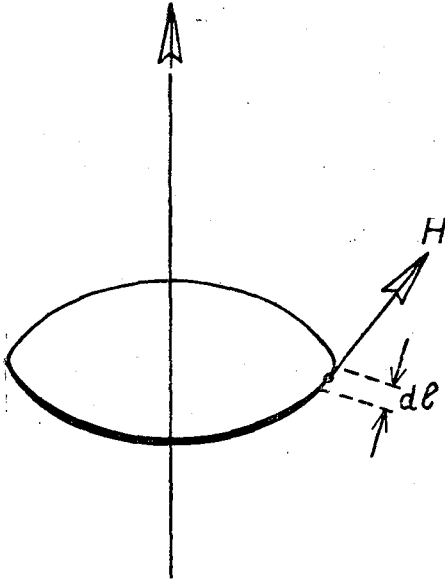


Рис. 11.

место в электрическом поле. При чем сила тока могла бы играть роль непосредственного фактора, устанавливающего потенциал магнитного поля. Однако, такое представление здесь осложняется тем обстоятельством, что магнитные силовые линии в противоположность электрическим являются замкнутыми, и потенциальная функция получается многозначной, т.е. неопределенной. Все же в пределах одного обхода магнитной линии напряженность поля можно, как оказывается, измерять в  $\frac{\text{амп.}}{\text{см}}$  ( $\frac{\text{ампервитках}}{\text{см}}$ ). Для предыдущего случая прямолинейного проводника:

$$\int_0^{2\pi r} H dl = H \int_0^{2\pi r} dl = H 2\pi r = I;$$

или 
$$H = \frac{I \text{ амп.}}{2\pi r \text{ см}}$$

Подобно электрическому полю, напряженность магнитного поля может характеризоваться плотностью силовых магнитных линий. Так, установив, напр., спектр магнитного поля достаточно длинного соленоида (рис. 12), можно сделать заключение, что внутри соленоида

поле почти равномерное ( $H_1 \cong \text{const}$ ) и, далее, что вне соленоида густота линий очень мала ( $H_2 \cong 0$ ). Отсюда вытекает важный практически результат, что в у-и Максвелла, представленном в форме

$$\int H_1 dl + \int H_2 dl = IW,$$

вторым слагаемым можно пренебречь. Тогда при  $H_1 \cong \text{const}$

$$H_1 l = IW \text{ или } H_1 = \frac{IW}{l} \frac{\text{амп. витк.}}{\text{см}}$$

где  $l$  — длина соленоида.

Сравнивая выражение  $H$  в эрстедтах и  $H$  в  $\frac{\text{амп.}}{\text{см}}$ , мы видим, что  $1 \frac{\text{амп.}}{\text{см}} = 0,4\pi \text{ эрст.} = 1,25 \text{ эрст.}$  Так, что число амп.:  $\frac{H \text{ амп.}}{\text{см}} = 0,8 H \text{ эрст.}$  Общее число магнитных линий может представить собой поток вектора напряженности.

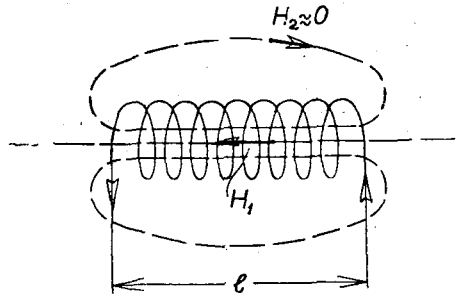


Рис. 12.

Различные тела, помещенные в магнитное поле, испытывают в той или иной степени магнитную поляризацию. Согласно электронной теории, электроны, движущиеся вокруг атомных ядер, представляют собой систему круговых токов, или магнитных диполей, с осями, совпадающими с осями вращения; так как электроны обладают все же некоторой массой, то такие системы ведут себя подобно волчкам.

Благодаря своему хаотическому расположению, эти круговые токи в нейтральном состоянии не проявляют никакого внешнего магнитного эффекта. Под влиянием же магнитного поля они начинают поворачиваться своими осями по направлению этого поля, принимая, таким образом, определенное ориентированное расположение. При



этом, естественно, они продолжают находиться в состоянии хаотического теплового молекулярного движения. Как известно, при повороте оси волчка у него возникает еще добавочное прецессионное движение, которое в данном случае соответствует новому прецессионному круговому току, дающему магнитный эффект, противоположный внешнему полю. В зависимости от того, что превалирует — эффект ли основного движения электронов, усиливающий внешнее поле, или эффект прецессионного движения, ослабляющий поле, — различаются тела парамагнитные и диамагнитные. Первые втягиваются внешним полем, вторые, наоборот, выталкиваются им. Особо сильными парамагнитными свойствами обладают железо, никель, кобальт, а также марганец и сплавы. Явления, в них происходящие, носят название ферромагнетизма. В железе мы встречаемся, напр., с явлением остаточной самоориентации молекулярных магнитных диполей, называемым остаточным магнетизмом. Весьма наглядной иллюстрацией этого эффекта служит опыт Юнга с магнитными стрелками. Железо играет очень видную роль в Э., поэтому в дальнейшем мы рассмотрим магнитную цепь с железом.

Явления, возникающие при введении железа в соленоид с током, можно количественно рассмотреть двояким образом. Можно было бы считать, что магнитное поле усиливается под влиянием добавления к внешним ампервиткам соленоида ампервитков внутренних молекулярных токов, так что:

$$AW_{\text{рез}} = AW_{\text{сол}} + AW_{\text{внутр.}}$$

Однако, исторически сложилось иное количественное представление. Подобно электрическому полю, где напряженности поля соответствует определенное электрическое смещение, устанавливают зависимость между напряженностью магнитного поля  $H$  и плотностью магнитного потока индукции в железе  $B$ :

$$B = \mu H,$$

где  $\mu$  — т. наз. коэфф. магнитной проницаемости. Для воздуха и пустоты  $\mu = 1$ ; для диамагнитных тел  $\mu < 1$ ; для парамагнитных  $\mu > 1$ ; для железа  $\mu$  от 200

до 2000 и выше. Величина  $B$  называется просто магнитной индукцией и измеряется в гауссах, если  $H$  выражено в эрстедтах. Ниже, в связи с эл. магн. индукцией, мы встретимся еще с другой единицей для измерения  $B$ .

В соответствии с таким представлением опытным путем находят для различных сортов железа кривые  $B = f(H)$ , т. наз. кривые намагничивания (рис. 13). Как мы видим, кривые намагничивания, начиная с некоторого значения индукции (порядка 13.000 гаусс), загибаются по направлению к оси абсцисс: наступает, как говорят, магнитное насыщение железа.

Пользуясь приведенными соотношениями, можно вывести ур-е Гопкинсона для магнитной цепи, более известное под названием закона Ома для магнитной цепи. Действительно, если вначале представить себе такую цепь, составленную из замкнутого железного сердечника всюду одинакового сечения  $S$  см<sup>2</sup>, при чем для возбуждения магнитного потока пусть служит соленоид из  $W$  намотанных на этот сердечник витков с силой тока  $I$  ампер, то

$$\Phi = BQ = \mu HQ.$$

Но  $H = 0,4\pi \frac{IW}{l}$  ампервитков/см, где  $l$  — длина магнитной цепи. Тогда

$$\Phi = 0,4\pi \mu \frac{IW}{l} Q, \text{ или } \Phi = \frac{IW}{\frac{1}{0,4\pi} \frac{l}{\mu Q}} = \frac{IW}{R_{\mu}}. \text{ Выражение } \frac{1}{0,4\pi} \frac{l}{\mu Q} \text{ носит}$$

название магнитного сопротивления, а  $IW$  — магнитного напряжения. Если теперь допустить в более общем случае, что магнитная цепь не однородна, а состоит из отдельных частей неодинакового сечения и изготовлена из неодинакового материала (включая и воздушный промежуток), то можно взять сумму магнитных сопротивлений этих последовательно соединенных частей.

Для параллельного разветвления магнитной цепи справедливы правила Кирхгофа. В соответствии с описанным может быть произведен расчет магнитной цепи, при котором ставится или задача о нахождении магнитного потока  $\Phi$  по заданным размерам цепи и величине  $IW$ , или, наоборот, необ-

ходимое значение ампервитков ( $IW$ ) для возбуждения заданного магнитного потока. Первая задача, однако, не может

себе истории этого открытия, приведем формулировку этого закона, данную Максвеллом, как теоретически более

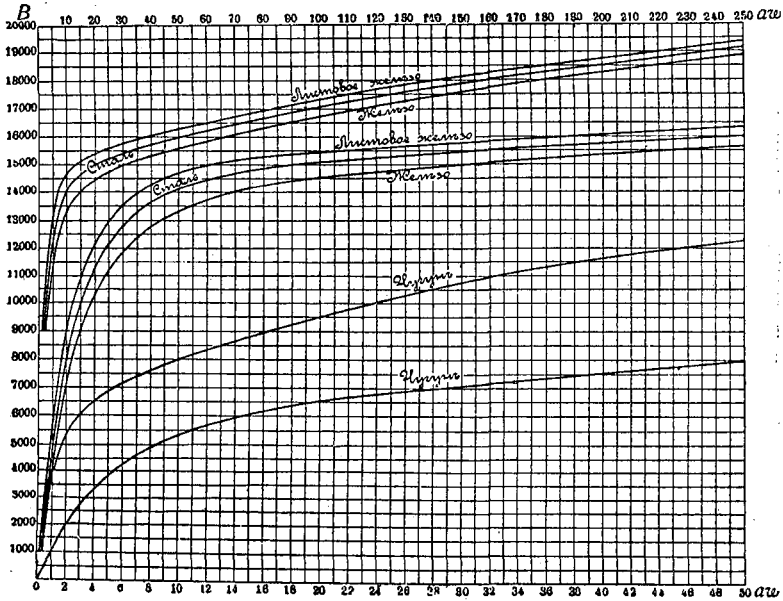


Рис. 13.

быть решена непосредственно, так как коэфф. проницаемости  $\mu$  есть величина, зависящая от неизвестного в данном случае потока  $\Phi$ . Поэтому решают всегда вторую задачу по схеме:

$$AW_{\text{общ}} = \Sigma aw_{\text{ж}} l_{\text{ж}} + 0,8B\delta.$$

Здесь:  $B$ —магнитная индукция в воздушном зазоре;  $\delta$ —величина воздушного промежутка в см;  $aw_{\text{ж}}$ —напряженность поля в железе в  $\frac{\text{ампвитк.}}{\text{см}}$ ,

находится из кривых намагничивания по плотности магнитного потока ( $B_{\text{ж}} = \frac{\Phi}{Q_{\text{ж}}}$ );  $l_{\text{ж}}$ —длина железных участков магнитной цепи в см. Решив такую задачу для различных  $\Phi$ , строят кривую  $\Phi = f(IW)$  и после этого графически находят решение первой задачи.

Можно без преувеличения сказать, что все современное состояние Э., в особенности сильных токов, обязано открытому в 1831 г. Фарадеем явлению электромагнитной индукции. Не касаясь очень поучительной самой по

удобную: в пространстве с изменяющимся магнитным полем во всяком замкнутом контуре действует электрическое напряжение, пропорциональное скорости изменения магнитного потока, охватываемого этим контуром (Фиг. 14):

$$e = - \frac{d\Phi}{dt},$$

или в более общей форме: в пространстве, где действует переменное магнитное поле, одновременно возникает и вихревое электрическое поле, при чем всякое изменение магнитного поля может быть представлено как поперечное перемещение уплотняющихся или разрежающихся

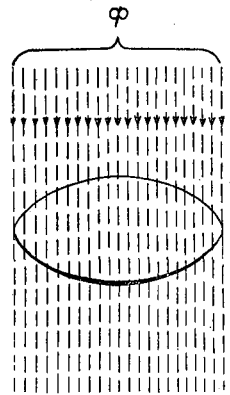


Рис. 14.

силовых линий. Такое представление и было использовано Фарадеем, который наведенное в замкнутом образцом каким-либо проводником контуре напряжение мыслил себе получающимся за счет скорости перерезывания этим проводником движущихся относительно него силовых линий:

$$e = - \frac{dN}{dt},$$

где  $N$ —число перерезанных линий.

В связи с этими двумя формулировками происходил ряд недоразумений (встречающихся еще и в настоящее время), возникающих из-за предъявляемого иногда требования формальной универсальности их в применении к вихревому полю и к замкнутому вполне и не вполне контуру из проводников. Таково, например, положение

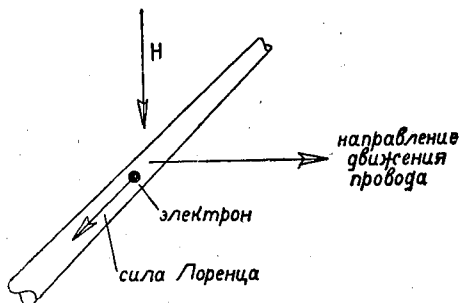


Рис. 15.

вопроса об униполярной индукции, об опытах стакназ. изменяемым контуром, проблемы бесколлекторной машины постоянного тока. Вряде подобных случаев полезно иметь в виду, что электроны, содержащиеся в веществе проводника или какой-либо другой среды, при всяком относительном поперечном движении их в магнитном поле испытывают силу Лоренца, увлекающую их в направлении, перпендикулярном к движению и к силе поля (рис. 15). Направление наведенного при электромагнитной индукции напряжения определяется проще всего по принципу Ленца, вытекающему из закона сохранения энергии: наведенное напряжение направлено всегда таким образом, что оно стремится вызвать электрический ток, препятствующий изменению потока (или индуктирующей причине

вообще). Так, например, если на рис. 14 замкнутый виток находится под действием убывающего (спадающего) магнитного потока, то наведенное напряжение будет стремиться вызвать ток, поддерживающий прежнюю величину потока.

Выражение  $e = - \frac{d\Phi}{dt}$  позволяет установить единицу для измерения магнитного потока, а именно—одна вольтсекунда.

В соответствии с этим и магнитная индукция, т. е. плотность магнитного потока  $B = \frac{\Phi}{Q}$ , может измеряться в вольтсекундах на  $1 \text{ см}^2$ . Исторически приняты, однако, единицы в  $10^8$  раз мельче, а именно для  $B$ —гаусс =  $10^{-8}$  вольтсекунда/см<sup>2</sup> (см. выше) и для  $\Phi$ —максвелл =  $10^{-8}$  вольтсек.

Если принять во внимание, что под действием электромагнитной индукции могут находиться несколько последовательно соединенных витков, то тогда закон электромагнитной индукции примет следующую форму:

$$e = - \frac{Wd\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт},$$

где  $W$ —число витков. Это выражение является основным для электромашиностроения, так как позволяет вычислять напряжение в машинах и трансформаторах.

Наблюдения за явлением электромагнитной индукции показывают, что оно возникает также и тогда, когда по самому витку будет протекать от постороннего источника ток меняющейся силы. Действительно, тогда вокруг витка возникает собственное изменяющееся магнитное поле и поэтому в витке будет наводиться электрическое напряжение, как говорят, от самоиндукции. Это обстоятельство играет основную роль в цепях переменного тока. Для количественного учета явления самоиндукции вводится понятие об индуктивности (раньше наз. коэфф. самоиндукции) какого-либо устройства:

$$L = \frac{Wd\Phi}{di} \cdot 10^{-8}$$

$$\text{или для воздуха } L = \frac{W\Phi}{i} \cdot 10^{-8},$$

так что закон электромагнитной индукции принимает форму:

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

Как мы видим, индуктивность представляет собой число потокоцеплений ( $W\Phi$ ), возникающее под влиянием прохождения тока силой в 1 ампер.

Индуктивность измеряется в единицах генри, при чем 1 генри представляет собою индуктивность такой катушки, в которой при изменении тока на один ампер в сек. наводится 1 вольт напряжения.

Определим индуктивность катушки с  $W$  витками:  $L = \frac{W\Phi}{i} \cdot 10^{-8}$ , но  $\Phi = \frac{iW}{R_{\mu}}$ , следовательно  $L = \frac{W^2}{R_{\mu}} \cdot 10^{-8}$ , где  $R_{\mu}$  — магнитное сопротивление.

Индуктивность двухпроводной линии получается путем интегрирования магнитного потока между проводами при силе тока в 1 ампер:

$$\begin{aligned} h &= 2 \int_r^d B_x \cdot l \cdot dx \cdot 10^{-8} = \\ &= 2 \int_r^d H_x \cdot l \cdot dx \cdot 10^{-8} = \\ &= \int_r^d \frac{0,2i}{x} l \cdot dx \cdot 10^{-8} = \\ &= 4l \cdot \ln \frac{d}{r} \cdot 10^{-9}; \end{aligned}$$

более точно с учетом потокоцеплений внутри сечения провода:

$$h = l \left( 1 + 4 \ln \frac{d}{r} \right) 10^{-9} \text{ генри.}$$

Одновременно с самоиндукцией необходимо бывает также рассмотреть и

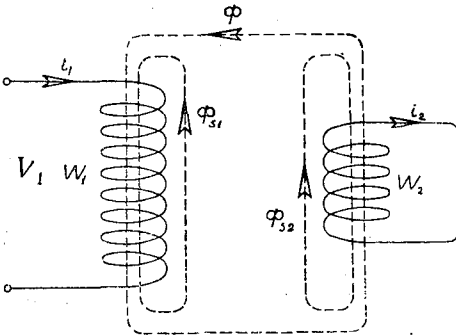


Рис. 16.

явление взаимной индукции между катушками (рис. 16). При изменении тока  $i_1$

в первой катушке, во второй будет наводиться напряжение:

$$e_2 = -W_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8},$$

или, аналогично предыдущему:

$$e_2 = - \frac{W_2 d\Phi}{di_1} \cdot \frac{di_1}{dt} \cdot 10^{-8} = -M \frac{di_1}{dt}$$

$M$  — наз. взаимной индуктивностью (раньше коэфф. взаимной индукции). Наоборот, когда проходит ток  $i_2$  во второй катушке, то в первой наводится напряжение

$$e_1 = -M \frac{di_2}{dt}$$

В общем техническом случае необходимо бывает учесть потоки рассеяния  $\Phi_{s1}$  и  $\Phi_{s2}$ , которые сцепляются только с первой или со второй катушками. В этом случае ур-ия балансов напряжений будут:

$$V_1 = i_1 r_1 + W_1 \frac{d(\Phi_{s1} + \Phi)}{dt} \cdot 10^{-8};$$

$$0 = i_2 r_2 + W_2 \frac{d(\Phi_{s2} + \Phi)}{dt} \cdot 10^{-8}.$$

Во втором ур-ии 0 вошел потому, что вторая катушка внешнего напряжения не имеет. Это ур-ие физически правильной было бы написать в следующем виде:

$$-W_2 \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} = i_2 r_2 + W_2 \frac{d\Phi_{s2}}{dt} \cdot 10^{-8}.$$

Поток взаимной индукции, передающий энергию из первичного контура во вторичный, наводится под действием двух токов  $i_1$  и  $i_2$ , так что

$$\Phi = \frac{i_1 W_1 + i_2 W_2}{R_{\mu}} \text{ (см. стр. 250).}$$

Потоки же рассеяния:

$$\Phi_{s1} = \frac{i_1 W_1}{R_{s1}}, \quad \Phi_{s2} = \frac{i_2 W_2}{R_{s2}}.$$

Вследствие этого

$$V_1 = i_1 r_1 + \frac{W_1^2}{R_{s1}} \cdot 10^{-8} \frac{di_1}{dt} + \frac{W_1^2}{R_{\mu}} \cdot 10^{-8} \frac{di}{dt} +$$

$$+ \frac{W_1 W_2}{R_{\mu}} \cdot 10^{-8} \frac{di_2}{dt},$$

$$0 = i_2 r_2 + \frac{W_2^2}{R_{s2}} \cdot 10^{-8} \frac{di_2}{dt} + \frac{W_2^2}{R_{\mu}} \cdot 10^{-8} \frac{di_2}{dt} +$$

$$+ \frac{W_1 W_2}{R_{\mu}} \cdot 10^{-8} \frac{di_1}{dt}$$

или, иначе,

$$V_1 = i_1 r_1 + S_1 \frac{di_1}{dt} + L_1' \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

$$0 = i_2 r_2 + S_2 \frac{di_2}{dt} + L_2' \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

Коэфф.  $S_1$  и  $S_2$  суть индуктивности рас-  
сеяния;  $S_1 + L_1' = L_1$  и  $S_2 + L_2' = L_2$   
наз. полными индуктивностями кату-  
шек. Очевидно, что:

$$M = \frac{W_1 W_2 \cdot 10^{-8}}{R_{\mu}} = \sqrt{\frac{W_1^2 \cdot 10^{-8} W_2^2 \cdot 10^{-8}}{R_{\mu} R_{\mu}}}$$

$$= \sqrt{L_1' \cdot L_2'} = \sqrt{(L_1 - S_1) (L_2 - S_2)}.$$

Магнитное поле содержит в себе опре-  
деленное количество энергии, которое  
можно подсчитать, исходя из следую-  
щих соображений. На основании поня-  
тия об индуктивности очевидно, что  
всякое изменение тока в катушке и,  
следовательно, связанное с этим изме-  
нение магнитного потока, соответствует  
импульсу напряжения:

$$edt = -Ldi.$$

Если помножить обе части этого ур-ня  
на силу тока  $i$  и, не обращая внима-  
ния на знак, взять интеграл:

$$\int e i dt = \int L i di,$$

то мы получим энергию магнитного  
поля, сцепленного с данной катушкой:

$$A = \frac{Li^2}{2} \text{ джоулей;}$$

при одном витке  $L = \frac{\Phi}{i} \cdot 10^{-8}$ , так что  $A =$

$$= \frac{\Phi i}{2} \cdot 10^{-8} \text{ джоулей или } A = \frac{\Phi i}{2} \text{ абс. ед.}$$

Энергия, отнесенная к 1 см<sup>3</sup> объема,  
будет равна:

$$A_1 = \frac{\Phi \cdot i}{2Q \cdot l} = \frac{BH}{2} \text{ или } \frac{BH}{8\pi},$$

если все выразить в абс. единицах.  
Это выражение энергии позволяет ре-

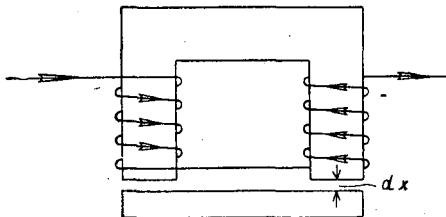


Рис. 17.

шать задачи о силах, действующих в  
магнитном поле. Например, подъемная  
сила магнита, изображенного на рис. 17,  
будет найдена, если подсчитать энер-  
гию в пространстве  $Q \cdot dx$ , где  $Q$  — по-

верхность соприкосновения якоря с ма-  
гнитами:

$$K \cdot dx = \frac{BH}{8\pi} \cdot Q \cdot dx.$$

Отсюда  $K = \frac{BH \cdot Q}{8\pi}$  дин. Для воздуха  
 $B = H$ . Так что в кг

$$K = \frac{B^2 Q}{9,81 \cdot 8\pi} \cdot 10^{-5} \text{ кг.}$$

Силу, действующую на провод с током  
 $i$ , помещенный в магнитное поле с на-  
пряженностью  $H$ , легче всего найти

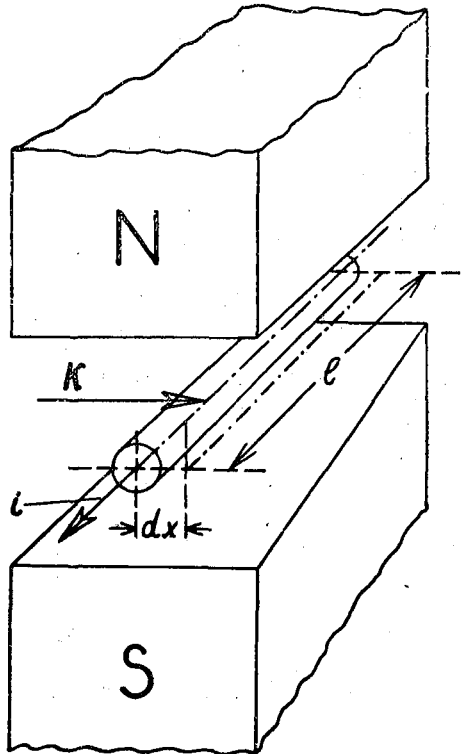


Рис. 18.

из следующих энергетических рассу-  
ждений (рис. 18). Дадим проводу пере-  
мещение  $dx$ . Тогда будет совершена  
механическая работа:

$$K dx.$$

С другой стороны, при движении в  
проводе возникнет напряжение:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d\Phi}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = - Bx \cdot l \cdot v,$$

где  $v$  — скорость движения. Это выра-  
жение само по себе является важным

в теории эл. машин. Отвлекаясь от знака, мы получим:

$$e = B \cdot l \cdot v \text{ абс. ед.}$$

$$e = B \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

По закону сохранения энергии:

$K \cdot dx = e \cdot i \cdot dt$ . Отсюда:  $K = B \cdot l \cdot i$  дин. Для воздуха  $B = H$ , так что  $K = 0,1 \cdot H \cdot i \cdot l$  дин (здесь  $i$  в амперах). Впервые это выражение было выведено Био и Саваром. Переводя в практ. ед., получим:

$$K = \frac{H i l}{9,81} \cdot 10^{-6} \text{ кг.}$$

Усилие между параллельными проводниками можно найти, принимая, что один провод находится в магнитном поле другого:

$$K = \frac{0,2 i_2}{d} \cdot \frac{i_1 l}{9,81} \cdot 10^{-6} = \frac{2 i_1 i_2 l}{9,81 d} \cdot 10^{-7} \text{ кг;}$$

подобное же выражение можно было бы вывести и исходя из изменения энергии магнитного поля между проводниками при элементарном перемещении их:

$$K \cdot dx = d \left( \frac{L i^2}{2} \right).$$

В случае непараллельных проводов в выражение для  $K$  надо ввести в качестве множителя  $\cos \alpha$ , где  $\alpha$  — угол между проводами.

Указанное выше выражение энергии магнитного поля на  $1 \text{ см}^3$  позволяет найти энергию, потерянную при намагничении железа. Действительно:

$$dA = d \left( \frac{BH}{2} \right) = d \left( \frac{B^2}{2\mu} \right) = HdB.$$

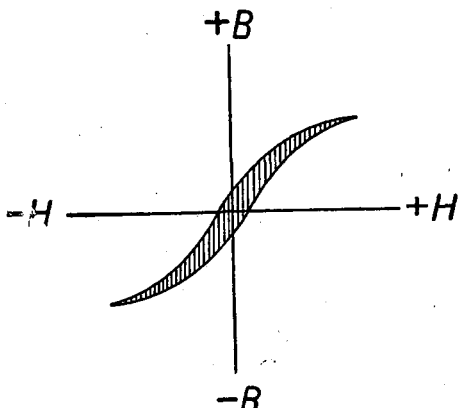


Рис. 19.

Как уже было указано, согласно опытам намагничения железа идет по т. наз. петлям гистерезиса (рис. 19). При

чем за каждый цикл перемагничения в железе остается энергии:

$$\int_{-B \max}^{+B \max} HdB \equiv \text{заштрих. на рис. площади.}$$

Исследования Штейнметца и Рихтера показывают, что потери на гистерезис равны:

$$A = h \cdot f \cdot B^{\gamma} \cdot V \text{ джоулей.}$$

Здесь:  $h$  — коэфф., завис. от сорта железа;  $f$  — число периодов перемагничения;  $\gamma$  — по Штейнметцу = 1,6, по Рихтеру = 2;  $V$  — объем железа в  $\text{см}^3$  или  $\text{дм}^3$ .

*Синусоидальный однофазный переменный ток.* В основу рассмотрения про-

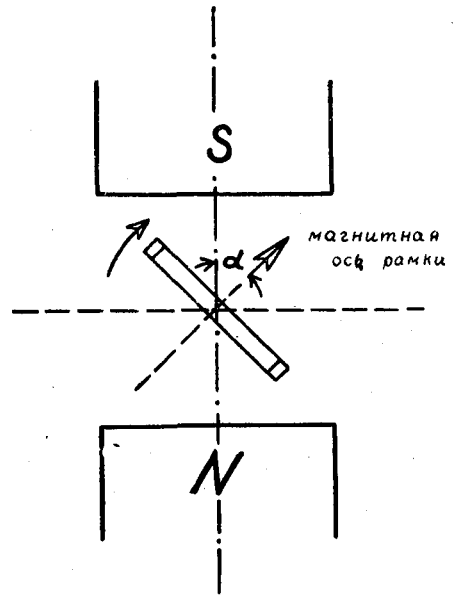


Рис. 20.

цесса получения такого тока кладется теоретический генератор пер. тока. Этот генератор представляет собой рамку из нескольких витков, вращающуюся в равномерном магнитном поле с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Как видно из рис. 20, поток, охватываемый этой рамкой, меняется по закону косинуса:

$$\Phi_t = \Phi_{\max} \cdot \cos \alpha = \Phi_{\max} \cos \omega t.$$

В силу этого в рамке возникает напряжение электромагнитной индукции:

$$e = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} = \omega \cdot w \cdot \Phi_{\max} \sin \omega t,$$

т.е. тоже синусоидальной формы, при чем максимальное значение  $E_{\max} = \omega \cdot w \cdot \Phi_{\max}$  получается в тот момент, когда  $\Phi = 0$ , и наоборот. Как говорят, между изменением магнитного потока и наведенным напряжением имеется сдвиг фаз (рис. 21).

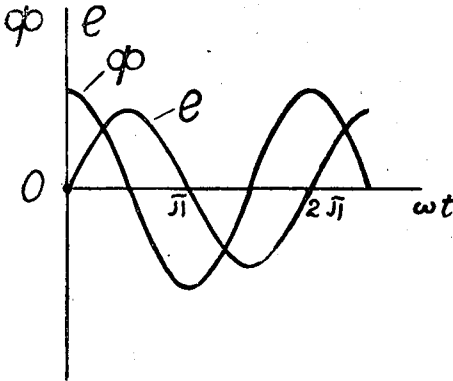


Рис. 21.

Так как синусоидальный закон изменения напряжения и силы тока является, как будет показано в дальнейшем, наиболее благоприятным в цепях переменного тока, то в Э. предъявляют к генераторам переменного тока требование, чтобы они давали практически синусоидальное напряжение. При чем в электротехн. нормах под практической синусоидой разумеется такая кривая, ординаты коей не отличаются более, чем на  $\pm 5\%$  от ординат эквивалентной теоретической синусоиды.

Основными понятиями, связанными с переменным током, служат: 1) период

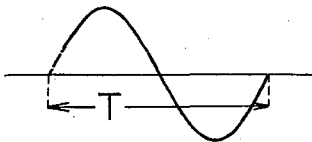


Рис. 22.

(рис. 22), измеряющийся в сек.; обозначается через  $T$ ; 2) частота перем. тока, или число периодов (число циклов) в 1 сек.; обозначается буквой  $f$ . Нормальной частотой в технике сильных токов является в СССР и в Европе 50 пер/сек; в Америке — 60 пер/сек; один пер/сек в Германии называют гертцем. В тех-

нике высокой частоты (радиотехнике) частота измеряется сотнями и тысячами килоциклов в 1 сек. (килогерц). Постоянный ток есть ток, частота которого  $f = 0$ , а период  $T = \infty$ . Очевидно, по самому взаимно обратному смыслу  $f$  и  $T$  (число периодов в 1 сек.

и число сек. в 1 периоде)  $f = \frac{1}{T}$ ;

3) иногда встречается еще термин — число перемен:  $f' = 2f$  (в 50-периодном токе — 100 перемен в 1 сек.); 4) различают также угловую частоту  $\omega = 2\pi f$ , т.е. частоту, выраженную в радианах в 1 сек.

Рассмотрение вопроса об измерении синусоидальных напряжений и сил тока приводит к тому заключению, что приборы, дающие всегда некоторое среднее значение измеряемой быстро меняющейся величины, в состоянии дать показание отличное от нуля только в том случае, если они работают по принципу квадратичных измерений (тепловые, электродинамич., электромагнитные, но никак не с постоянными магнитами). Поэтому вводится понятие о среднем квадратичном значении перем. тока и напряжения:

$$I_{\text{ср. кв.}} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T i^2 dt};$$

$$E_{\text{ср. кв.}} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^T e^2 dt}.$$

Для синусоиды это значение в  $\sqrt{2}$  раз меньше максимального:

$$I_{\text{ср. кв.}} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \quad \text{и} \quad E_{\text{ср. кв.}} = \frac{E_{\max}}{\sqrt{2}}.$$

В дальнейшем будет показано, что от этих значений зависит также мощность перем. тока, что дало повод называть их эффективными значениями.

В теории машин и трансформаторов, как оказывается, все же играет роль также и среднее арифметическое значение напряжения за полпериода:

$$E_{\text{ср.}} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} e dt,$$

которое для синусоиды в  $\frac{\pi}{2}$  раз меньше максимального:

$$E_{\text{ср.}} = \frac{2}{\pi} E_{\max}.$$

Отношение эффективного (ср. квадр.) значения к среднему называется коэф. формы кривой  $k$ . Для синусоиды

$$k = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} E_{\max}}{\frac{2}{\pi} E_{\max}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11.$$

Теория переменного тока получается проще и нагляднее лишь при использовании метода символических векторов. Любое количество синусоидальных токов и напряжений, очень сложно взаимно распределенных по

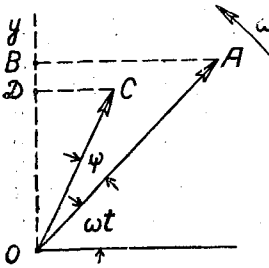


Рис. 23.

величине и фазе в цепи переменного тока, получает относительно простое изображение при помощи т. наз. векторных диаграмм. В самом деле, пусть длина  $OA$  некоего вращающегося вектора (рис. 23) представляет собой амплитуду переменного тока и пусть угловая скорость его вращения равно угловой частоте  $\omega$  этого тока. Тогда проекции  $OB$  вращающегося вектора на вертикальное направление  $Oy$  будут равны мгновенным значениям тока:

$$\overline{OB} = i_1 = I_{m1} \sin \omega t.$$

Для другого вектора  $OC$ , опережающего первый на угол  $\psi$ , будем иметь:

$$OD = i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + \psi).$$

Таким образом, оба вектора  $OA$  и  $OC$  могут быть рассматриваемы как символы двух переменных токов одинаковой частоты с амплитудами  $I_{m1}$  и  $I_{m2}$  и со сдвигом фаз  $\psi$ . Вращение этих векторов в Э. принято против часовой стрелки (в сторону положительного отсчета углов, принятого в аналитической геометрии). Вместо того, чтобы рассматривать вращение векторов, можно вообразить, что они неподвижны, а вращается в обратную сторону ось проекций, которая тогда называется *линией времени*. Однако, более удобным и распространенным является первое представление. Практически целесооб-

разно при этом брать длины векторов равными в некотором масштабе не амплитуде, а эффективному значению. Тогда для получения мгновенных значений проекции нужно умножать на  $\sqrt{2}$ .

Для сложения или вычитания двух или нескольких синусоид достаточно геометрически сложить или вычесть по правилу параллелограмма соответствующие символические векторы. Действительно, вектор  $OI$  результирующей синусоиды равен геометрической сумме векторов  $OI_1$  и  $OI_2$ , составляющих синусоид, так как его

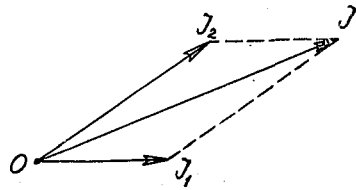


Рис. 24.

проекция на любую ось всегда равна сумме проекций  $i_1$  и  $i_2$  (рис. 24):

$$i = i_1 + i_2.$$

Разность векторов  $OI_1$  и  $OI_2$  равна сумме  $OI_1$  и взятого с обратным знаком  $OI_2$  (рис. 25).

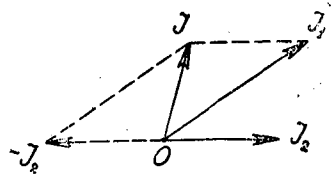


Рис. 25.

Начертим векторную диаграмму теоретического генератора, в котором (стр. 260):

$$\begin{aligned} \Phi_t &= \Phi_{\max} \cdot \cos \omega t = \\ &= \Phi_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \\ e &= E_{\max} \cdot \sin \omega t. \end{aligned}$$

Легко видеть, что вектор магнитного потока опережает вектор наведенного им напряжения на  $\frac{\pi}{2}$  или  $90^\circ$  (рис. 26).

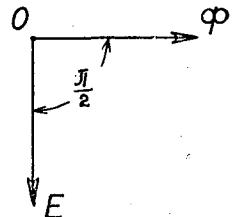


Рис. 26.



Установим, далее, законы прохождения переменного тока через безиндуктивное сопротивление, через индуктивность и через емкость в отдельности.

В безиндуктивном сопротивлении мгновенное значение силы переменного тока устанавливается по закону Ома:

$$i = \frac{e}{r}; \text{ но } e = E_{\max} \sin \omega t; \text{ тогда и}$$

$$i = \frac{E_{\max}}{r} \sin \omega t = I_{\max} \sin \omega t, \text{ т. е. в}$$

этом случае полностью справедлив закон Ома для всех значений тока и в частности для эффективного  $I = \frac{E}{r}$ , причём между током и напряжением нет никакого сдвига фаз. Вект. диагр. см. рис. 27.

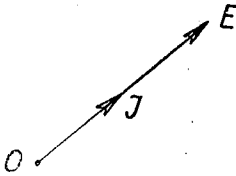


Рис. 27.

Иначе обстоит дело в случае индуктивности. Под влиянием внешнего переменного напряжения по катушке потечет переменный ток  $i$ , который возбудит в ней магнитный поток, а этот последний вызовет напряжение самоиндукции:

$$e_s = -L \frac{di}{dt}$$

в каждый момент времени равное и противоположное внешнему напряжению. Уже отсюда вытекает векторная диаграмма для данного случая (рис. 28), т. к., согласно предыдущего, ток должен совпадать по фазе с возбужденным потоком, а  $e_s$  отстает от потока на  $90^\circ$ . Математически имеем:

$$e = -e_s = L \frac{di}{dt}; \text{ но } i = I_m \cdot \sin \omega t, \text{ так что}$$

$$e = \omega L \cdot I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = E_{\max} \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Отсюда:  $E_{\max} = \omega L \cdot I_m$ , а переходя к эффективным значениям:

$$I = \frac{E}{\omega L}.$$

Мы видим, что формально здесь так же имеет место закон Ома; в качестве сопротивления здесь появляется выражение  $\omega L$ , которое и называется индуктивным сопротивлением и обозначается буквой  $X_L$ . При этом сила тока отстает по фазе от внешнего напряжения на  $90^\circ$ .  $X_L$  измеряется также в омах.

При прохождении переменного тока через емкость мы должны вначале найти напряжение на конденсаторе в зависимости от тока. Очевидно, что:

$$e_c = \frac{q}{C} = \frac{\int idt}{C},$$

где  $q$  — электрический заряд, а  $C$  — емкость в фарадах. Тогда, полагая  $e = e_c$  и  $i = I_m \sin \omega t$ , находим:

$$e = \frac{\int idt}{C} = \frac{\int I_m \sin \omega t}{C} = \frac{I_m}{\omega C} \cos \omega t = \frac{I_m}{\omega C} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = E_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right);$$

отсюда  $E_m = \frac{I_m}{\omega C}$  или, переходя на эффективные значения:

$$I = E \cdot \omega C = \frac{E}{\frac{1}{\omega C}}.$$

Выражение  $\frac{1}{\omega C}$  формально играет роль сопротивления и называется емкостным сопротивлением (обозначается  $X_c$ ). Мы видим, что здесь сила тока опережает внешнее напряжение на  $90^\circ$ .

После разбора отдельных случаев можно перейти к более общему по-

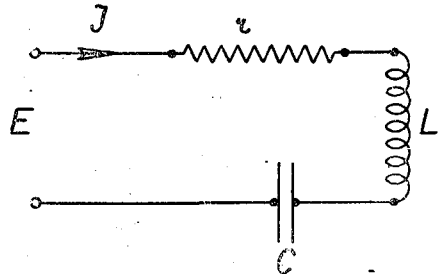


Рис. 29.

следовательно соединению  $r, L$  и  $C$  (рис. 29). Очевидно, что в каждом из этих элементов будет падение напряжения, так что баланс напряжений можно написать в следующем виде:

$$e = ir + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt.$$

Решение этого дифференциального уравнения относительно  $i$  обычными приемами является громоздким. Гораздо проще его решить для установившегося состояния символически, пользуясь векторной диаграммой. Действительно, каждый член ур-ия может быть представлен в виде вектора падения напряжения, при чем по отношению к току они должны быть ориентированы следующим образом:

$E_r = I r$  совпадает по фазе с  $I$ ;  
 $E_L = I X_L = I \omega L$  опережает  $I$  на  $90^\circ$   
 $E_c = I X_c = I \frac{1}{\omega C}$  отстает от  $I$  на  $90^\circ$ .

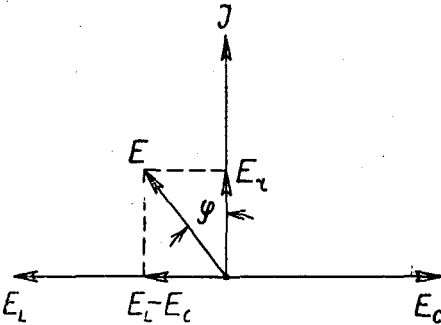


Рис. 30.

Тогда можно построить векторную диаграмму (рис. 30) и из нее

$$E = \sqrt{E_r^2 + (E_L - E_c)^2},$$

или иначе:

$$E = \sqrt{(I \cdot r)^2 + I(X_L - X_c)^2} = I \sqrt{r^2 + (X_L - X_c)^2},$$

т.е. получаем опять закон Ома:

$$I = \frac{E}{\sqrt{r^2 + (X_L - X_c)^2}}.$$

Выражение  $\sqrt{r^2 + (X_L - X_c)^2}$  называется полным (или иногда кажущимся) сопротивлением и обозначается буквой  $Z$ , так что

$$I = \frac{E}{Z};$$

$Z$  измеряется в омах.

Из векторной диаграммы следует далее, что между током  $I$  и напряжением  $E$  получается сдвиг фаз  $\varphi$ , при чем:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_c}{r}$$

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z}.$$

В соответствии с этим одним из решений вышенаписанного дифф. ур-ия, которое справедливо для установившегося режима в цепи переменного тока, является:

$$i = \frac{E_{\max}}{Z} \sin(\omega t - \varphi).$$

Представляет особый интерес случай, когда  $X_L = X_c$ . Тогда сила тока, как оказывается, зависит лишь от  $r$ , а напряжения  $E_L$  и  $E_c$  взаимно компенсируются, хотя могут достигать очень больших по сравнению с  $E$  значений. Действительно, возьмем сильно утрированный теоретический пример:  $E = 100$  вольт;  $r = 0,1 \Omega$ ;  $X_L = 100$ ;  $X_c = 100 \Omega$ . Здесь:

$$I = \frac{100}{\sqrt{(0,1)^2 + (100 - 100)^2}} = 1000 \text{ амп.}$$

$$E_L = I X_L = I X_c = E_c = 1000 \cdot 100 = 10^6 \text{ вольт.}$$

Этот случай называется резонансом напряжений и является опасным эксплуатации с точки зрения перенапряжений.

При параллельном соединении приходится уже складывать силы токов

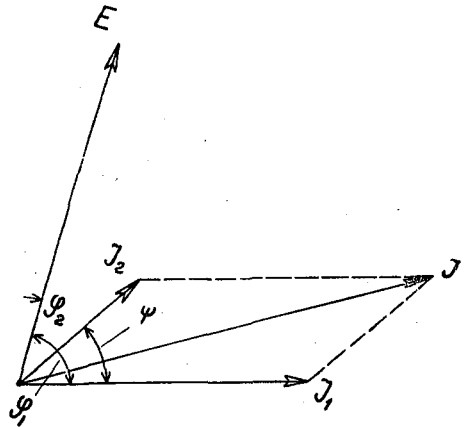


Рис. 31.

(рис. 31), при чем очевидно, что вектор результирующего тока будет равен

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2 \cos \psi},$$

$$\text{а } I_1 = \frac{E}{Z_1}; \quad I_2 = \frac{E}{Z_2}; \quad \psi = \varphi_1 - \varphi_2;$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{X_{L1} - X_{c1}}{r_1}; \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X_{L2} - X_{c2}}{r_2}.$$

Вместо такого приема можно разложить силы токов на составляющие,

совпадающие по фазе с напряжением и сдвинутые относительно него на  $90^\circ$  — т. наз. активные и реактивные составляющие тока (рис. 32):

$$I_a = I_1 \cos \varphi$$

$$\text{и } I_b = I \sin \varphi.$$

Тогда, очевидно, при параллельном соединении:

$$I = \sqrt{(\sum I_a)^2 + (\sum I_b)^2}.$$

В связи с этим вводится также понятие об активных  $g$  и реактивных  $b$  проводимостях. Действительно:  $I = \frac{E}{Z}$  ;

но пусть  $\frac{1}{Z} = y$  — полной (или кажущейся) проводимости. Тогда:  $I = E \cdot y$ .

Пусть, далее, аналогично: активная слагающая тока  $I_a = E \cdot g$  и реактивная  $I_b = E \cdot b$ ; отсюда

$$I = E \cdot y = \sqrt{I_a^2 + I_b^2} = E \sqrt{g^2 + b^2},$$

или  $y = \sqrt{g^2 + b^2}$ , при чем

$$I_a = E g = I \cdot \cos \varphi = E \cdot y \cdot \cos \varphi$$

$$I_b = E \cdot b = I \cdot \sin \varphi = E \cdot y \cdot \sin \varphi,$$

или  $g = y \cdot \cos \varphi$  и  $b = y \cdot \sin \varphi$ ; через сопротивления  $r$  и  $X = X_L - X_C$  проводимости выражаются следующим образом:

$$g = y \cdot \cos \varphi = \frac{1}{Z} \cdot \frac{r}{Z} = \frac{r}{Z^2};$$

$$b = y \cdot \sin \varphi = \frac{1}{Z} \cdot \frac{X}{Z} = \frac{X}{Z^2}.$$

На рис. 33 представлены треугольники сопротивлений и проводимостей. При параллельном соединении индуктивности и емкости особый интерес представляет схема, когда  $b_L = b_C$ , т. е.

$$\frac{X_L}{r_1^2 + X_L^2} = \frac{X_C}{r_2^2 + X_C^2}.$$

В этом случае результирующий ток  $I$  не имеет реактивной составляющей и, следов., совпадает по фазе с внешним напряжением (рис. 34). Это явление называется резонансом токов и широко используется практически для компенсации сдвига фаз.

Мощность переменного тока получится, если перемножить мгновенные значения  $e$  и  $i$ :

$$ei = E_m \cdot \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi),$$

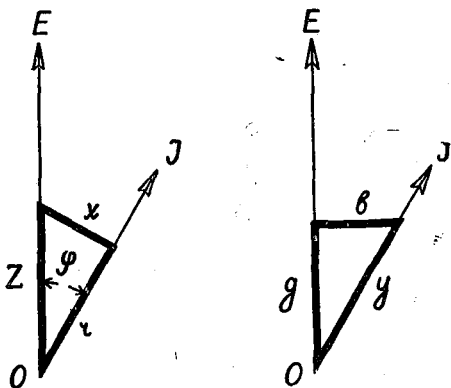


Рис. 33.

что после преобразования приводит к выражению

$$P = ei = \frac{E_m I_m}{2} \cos \varphi - \frac{E_m I_m}{2} \cos(2\omega t - \varphi),$$

т. е. мощность является также переменной синусоидальной величиной, но

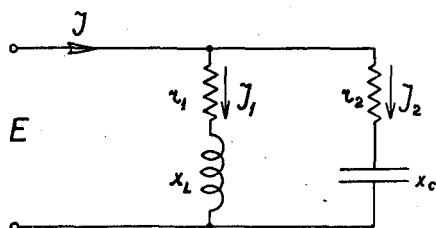


Рис. 34.

двойной ( $2\omega$ ) частоты. Приборы, измеряющие мощность (ваттметры), показывают среднее значение:

$$P_{cp} = \frac{E_m I_m}{2} \cos \varphi,$$

или, переходя к эфф. значениям:

$$P_{cp} = \frac{E_m I_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} \cdot \cos \varphi = E \cdot I \cdot \cos \varphi.$$

Это выражение и принимают обыкновенно за мощность переменного тока:

$$P = EI \cdot \cos \varphi.$$

Мы видим, что мощность перемен. тока зависит от сдвига фаз. При  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  мощность равна нулю, так как  $\cos \varphi = 0$ .

Это дает повод называть  $\cos \varphi$  коэффициентом мощности. Заметим, что такое выражение получается только для синусоидальных тока и напряжения. В другом случае войдет еще коэффициент искажения. Итак, мощность переменного тока равна нулю, когда  $\varphi = 90^\circ$  и  $\cos \varphi = 0$ , т.е. когда в цепи есть только индуктивность или емкость. Однако, это справедливо только для среднего значения  $P$ ; так как в любой момент происходит заряд или разряд  $L$  или  $C$ , которые содержат энергии:  $\frac{Li^2}{2}$  и  $\frac{Ce^2}{2}$ . В соответствии с этим принято различать активную мощность и реактивную:

$$P_a = EI \cdot \cos \varphi = EI a$$

$$P_b = EI \cdot \sin \varphi = EI b$$

и, наконец, полную или кажущуюся мощность  $E I$  вольтампер (но уже не ватт). В технике сильных токов коэффициент мощности стремятся держать близким к единице, так как от этого зависит рациональное использование активных материалов устройств, рассчитанных на напряжение  $E$  и на силу тока  $I$ .

Активная мощность перем. тока может быть выражена еще и иначе:

$$P = E \cdot I \cdot \cos \varphi = EI \frac{r}{Z} = I^2 r =$$

$$= \frac{E^2}{Z^2} = E^2 \frac{r}{Z^2} = E^2 g.$$

Отсюда и возникло понятие о среднем квадратичном значении  $e$  и  $i$  как об эффективном.

*Символический метод.* В векторных диаграммах, употребляемых для изображения синусоидально меняющихся величин, каждый вектор вполне определяется двумя координатами, длиной и фазой, т.е. углом, который составляет этот вектор с осью  $OX$  (рис. 35). Пользуясь комплексными числами, можно определять вектор при помощи проекций на две взаимно перпендикулярные оси координат, при чем проекция на вертикальную ось снабжаются символическим коэфф.  $j$ . Тогда каждый вектор может быть изображен комплексным числом. Напр.  $\vec{I} = I + jI''$ .

Умножению какого-нибудь вектора на коэфф.  $j^n$ , где  $n$  — действительное число, соответствует поворот этого

вектора на угол, равный  $n \frac{\pi}{2}$ , против часовой стрелки. Если, напр.,  $n = 2$ , то  $j^2 = -1$ , и поворот совершается на угол  $2 \frac{\pi}{2} = \pi$ , т.е. на  $180^\circ$ . Такой же результат получается при умножении вектора на  $e^{j\varphi}$ , где  $\varphi$  выражено в радианах.

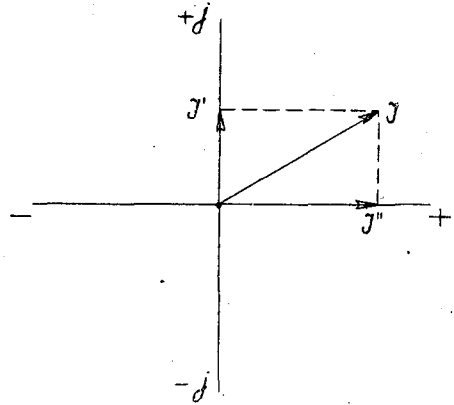


Рис. 35.

Символический метод имеет то преимущество, что, пользуясь им, можно все необходимые при решении задач в цепях перем. токов действия с векторами сил токов и напряжений, напр. сложения и вычитания, нахожд. отношения и ур., производить аналитически; при этом удобно выражаются не только отношения между амплитудами векторов, но и сдвиг фаз между ними. Особенно это удобно в случаях разветвленных цепей, где приходится составлять системы ур-ий.

Все вычисления производятся в соответствии с теорией комплексов, основные положения которой следующие:

1)  $a \pm jb = r (\cos \varphi \pm j \sin \varphi) = r \cdot e^{\pm j\varphi}$ ; здесь  $r = \sqrt{a^2 + b^2}$  — модуль комплексса, или амплитуда изображаемого им вектора,  $e$  — основание натур. логарифмов;  $\text{tg } \varphi = \frac{b}{a}$  — фаза вектора.

2) Если

$$\vec{r}_1 = a_1 + jb_1$$

$$\vec{r}_2 = a_2 + jb_2,$$

то:  $\vec{r}_1 \pm \vec{r}_2 = (a_1 \pm a_2) + j(b_1 \pm b_2)$

и  $\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 = r_1 r_2 e^{j(\varphi_1 + \varphi_2)}$

$$\begin{aligned} \vec{r}_1 &= \frac{r_1}{r_2} e^{j(\varphi_1 - \varphi_2)} \\ \vec{r}_2 &= \frac{r_2}{r_2} e^{j(\varphi_2 - \varphi_2)} \\ \vec{r}^n &= r^n \cdot e^{jn\varphi} \\ \sqrt[n]{\vec{r}} &= \sqrt[n]{r} \cdot e^{j\frac{\varphi}{n}} \end{aligned}$$

Кроме того, если

$$\vec{I} = I \cdot e^{j\omega t},$$

то

$$\frac{d\vec{I}}{dt} = j\omega \vec{I}$$

и

$$\int \vec{I} dt = \frac{\vec{I}}{j\omega} = -\frac{jI}{\omega}$$

Применяя символический метод к цепям переменных токов, мы получим следующие выражения:

1) Закон Ома

$$\begin{aligned} \vec{E} = \vec{I} z &= \vec{I} z e^{j\varphi} = Iz e^{j(\omega t + \varphi)} = \\ &= E \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}, \text{ где} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z = \sqrt{r^2 + x^2} \text{ и } z &= r + j(X_L - X_C) = \\ &= Z \cdot e^{j\varphi} \end{aligned}$$

или иначе

$$\vec{I} = \vec{E} \cdot \vec{y} = E \cdot \vec{y} \cdot e^{-j\varphi} = Ey \cdot e^{j\omega t} = I \cdot e^{j\omega t}$$

где  $y$  — полная проводимость — выражается чрез активную проводимость  $g$  и реактивную  $b$  следующим образом:

$$\vec{y} = g - j \cdot b = y \cdot e^{-j\varphi}.$$

2) Законы Кирхгофа

$$\Sigma \vec{y} = 0; \quad \Sigma \vec{E} = \Sigma \vec{I} z.$$

Эквивалентное полное сопротивление двух параллельных ветвей равно

$$\vec{Z} = \frac{\vec{Z}_1 \vec{Z}_2}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2},$$

где  $\vec{Z}_1$  и  $\vec{Z}_2$  — полные сопротивления этих ветвей.

В то время, как при умножении или делении векторов  $\vec{E}$  или  $\vec{I}$  на комплексы  $\vec{y}$  или  $\vec{Z}$ , фазы коих не зависят от времени, мы получаем вектор, вращающийся с той же угловой скоростью, произведение  $\vec{E}$  и  $\vec{I}$  представляет собой, согласно теории комплексов, вектор, вращающийся с двойной угловой скоростью:

$$\vec{E} \cdot \vec{I} = E \cdot I \{ \cos(2\omega t + \varphi) + j \sin(2\omega t + \varphi) \}.$$

Это выражение не имеет физического смысла. Однако, если заменить один

комплексный вектор ему сопряженным, т.е. таким, который отличается лишь знаком перед мнимой частью, то получим:

$$\vec{E} \cdot \vec{I}' = E \cdot I \{ \cos \varphi + j \sin \varphi \};$$

$$\vec{E}' \cdot \vec{I} = E \cdot I \{ \cos \varphi - j \sin \varphi \}.$$

Действительная часть этого выражения дает активную мощность, мнимая же — реактивную, которая в зависимости от того, к какому вектору берется сопряженный вектор (к  $\vec{E}$  или к  $\vec{I}$ ), получает разные знаки. Так как среднее значение реактивной мощности равно нулю, то знак не имеет значения. Однако, если бы условиться считать положительное направление реактивной мощности от источника тока в цепь, то тогда, в случае наличия самоиндукции в цепи, это направление реактивной мощности будет положительным, а в случае емкости — наоборот, отрицательным.

Для обобщения следует заметить, что если при решении какой-либо задачи получается отрицательная активная мощность, идущая от источника, то это следует истолковать так, что в цепи имеется отрицательное сопротивление  $r$ , являющееся в таком случае не сопротивлением, как таковым, а, наоборот, источником электрической энергии.

Применение символического метода является неизбежным, когда приходится решать задачу о токораспределении в разветвленной цепи. В этом случае применяются законы Кирхгофа совершенно подобно тому, как для цепей постоянного тока.

В комплексной форме могут быть представлены не только векторы не меняющихся по величине силы тока и напряжения, но и простейшие геометрические места концов меняющихся по величине векторов. Так, например, комплексное уравнение прямой:

$$\vec{M} = \vec{A} + k \cdot \vec{B}.$$

Уравнение окружности, проходящей чрез нач. координат 0:

$$\vec{M} = \frac{\vec{A}}{B + k \cdot C}$$

и не проходящей чрез нач. коорд. 0:

$$\vec{M} = \frac{\vec{A} + k \cdot \vec{B}}{C + k \cdot D}$$

В этих ур-ниях  $\vec{A}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{C}$  и  $\vec{D}$  — постоянные комплексные величины, а  $k$  — переменная величина.

**Метод наложения.** Расчет распределения токов и напряжения в цепи с узловыми точками значительно облегчается применением принципа наложения (суперпозиции), который вытекает из линейности ур-ий Кирхгофа и согласно которому ток в любой ветви складывается из тех токов, которые получились бы в этой ветви, если бы каждый из источников напряжения действовал во всей цепи в отдельности.

В соответствии с изложенным иногда бывает удобно поступить несколько иначе, а именно: на действительное токораспределение наложить токораспределение, которое получится, если в какой-либо ветви ввести такое напряжение, чтобы в результате в этой ветви ток стал бы равен нулю и ее можно было бы рассматривать, как разомкнутую.

Бывает проще решить задачу относительно измененной схемы (с разомкнутой ветвью) с фактически действующими в полной схеме напряжениями источников и относительно искусственно наложенного напряжения в отдельности. Действительное первоначальное токораспределение получится в результате вычитания найденных токораспределений.

Поясним это на примере с мостиком (рис. 36). Найдем вначале токораспределение, когда диагональ  $CD$  разомкнута, т. е.:  $\vec{I}_5 = 0$ .

Тогда:

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_2 = \frac{\vec{E}_{AB}}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2}$$

$$\vec{I}_3 = \vec{I}_4 = \frac{\vec{E}_{AB}}{\vec{Z}_3 + \vec{Z}_4}$$

Искусственно накладываемое напряжение  $\vec{E}'_{CD}$  должно быть равно и противоположно

$$\vec{E}'_{CD} = -\vec{E}_{AB} \left( \frac{\vec{Z}_2}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} - \frac{\vec{Z}_4}{\vec{Z}_3 + \vec{Z}_4} \right)$$

Отсюда, переходя ко второму токораспределению, находим:

$$\vec{I}_5'' = -\vec{I}_5 = \frac{\vec{E}''_{CD}}{\vec{Z}_K + \vec{Z}_5} = -\frac{\vec{E}'_{CD}}{\vec{Z}_K + \vec{Z}_5},$$

где  $\vec{Z}_K = \frac{\vec{Z}_1 \vec{Z}_2}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} + \frac{\vec{Z}_3 \vec{Z}_4}{\vec{Z}_3 + \vec{Z}_4}$  есть

сопротивление коротко замкнутого диагонально  $AB$  (внутренним сопротивлением источника  $E_{AB}$  пренебрежем) четырехугольника по отношению к токкам  $CD$ .

Мы видим, что действительное токораспределение таково:

$$\vec{I}_5 = \vec{I}_5 - I_5'' = \frac{\vec{E}'_{CD}}{\vec{Z}_K + \vec{Z}_5}$$

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_1 - \vec{I}_1'' = \frac{\vec{E}_{AB}}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} + \vec{I}_5 \frac{\vec{Z}_2}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2}$$

$$\vec{I}_2 = \vec{I}_2 - \vec{I}_2'' = \frac{\vec{E}_{AB}}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} - \vec{I}_5 \frac{\vec{Z}_1}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2}$$

$$\vec{I}_3 = \vec{I}_3 - \vec{I}_3'' = \frac{\vec{E}_{AB}}{\vec{Z}_3 + \vec{Z}_4} - \vec{I}_5 \frac{\vec{Z}_4}{\vec{Z}_3 + \vec{Z}_4}$$

$$\vec{I}_4 = \vec{I}_4 - \vec{I}_4'' = \frac{\vec{E}_{AB}}{\vec{Z}_3 + \vec{Z}_4} + \vec{I}_5 \frac{\vec{Z}_3}{\vec{Z}_3 + \vec{Z}_4}$$

Общий ток  $\vec{I}$  получается равным:

$$\begin{aligned} \vec{I} &= \vec{I}' - \vec{I}'' = \vec{I}' - (\vec{I}_1'' - \vec{I}_3'') = \\ &= \vec{I}' + \vec{I}_5 \left( \frac{\vec{Z}_2}{\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2} - \frac{\vec{Z}_4}{\vec{Z}_3 + \vec{Z}_4} \right) = \\ &= \vec{I}' + \vec{I}_5 \frac{\vec{E}'_{CD}}{E_{AB}}, \end{aligned}$$

т. е.  $\vec{I}$  является суммой тока  $\vec{I}_1$ , возникающего при разомкнутой диагонали  $CD$ , и тока  $\vec{I}_5$ , умноженного на отношение  $\frac{\vec{E}'_{CD}}{E_{AB}}$ .

Если последнее выражение помножить на  $E_{AB}$ , то мы получим уравнение, говорящее о наложении мощностей:

$$\vec{E}_{AB} \vec{I} = \vec{E}_{AB} \vec{I}_1 + \vec{E}'_{CD} \vec{I}_5$$

В схеме фиг. 37, называемой еще всеобщей эквивалентной схемой цепей переменного тока, весьма распространено применение метода наложения двух режимов: холостого хода и короткого замыкания. При этом нагрузка внешней цепи, характеризующаяся в схеме

полным сопротивлением  $\vec{Z}_2$ , бывает задана двумя векторами  $\vec{V}_2$  и  $\vec{I}_2$ , сдвинутыми по фазе на угол  $\varphi_2$ . Опыт холостого хода ( $I_2=0$ ) осуществляется при напряжении  $U$  вторичных клемм, равном напряжению при нагрузке, т.е.  $V_2$ . Опыт короткого замыкания ( $V_2=0$ ) делается при силе тока во внешней цепи равной  $I_2$ . Тогда  $V_1$  и  $I_1$  при нагрузке, а также и все остальные величины можно, оказывается, выразить через  $V_2$  и  $I_2$ :

$$\vec{U}_1 = \vec{A} \cdot \vec{I}_2 + \vec{B} \cdot \vec{U}_2$$

$$\vec{I}_1 = \vec{C} \cdot \vec{I}_2 + \vec{D} \cdot \vec{U}_2$$

Эти выражения были выведены впервые Брейзигом и поэтому наз. ур-иями Брейзига.

**Метод инверсии.** В том случае, когда в цепи не все сопротивления и реакции (постоянные цепи) остаются неизменными, а одно из них меняется, обычно употребляют для исследования графический метод инверсии.

Этот метод состоит в том, что находят

метрическое место (прямоугольником), то геометрическим местом обрат-

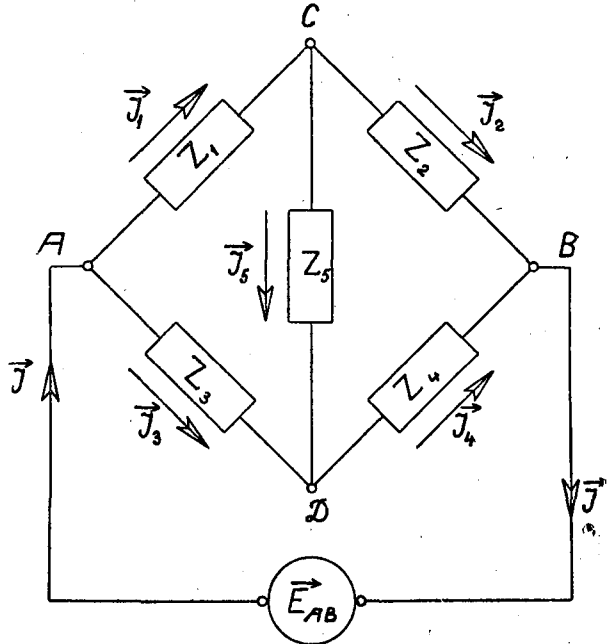


Рис. 36.

но, пусть, напр.,  $\vec{Z} = r + jk \cdot x$  (рис. 38а),

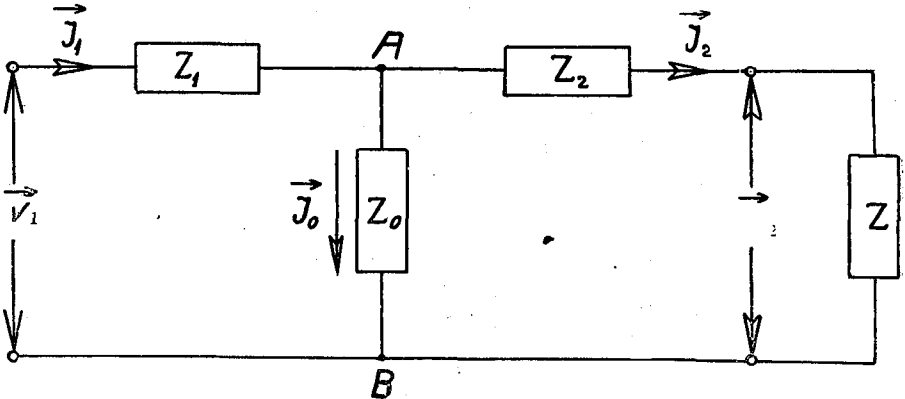


Рис. 37.

или напряжения, при изменении постоянных цепи. Полученные таким образом диаграммы наз. соотв. инверсными (или круговыми) диаграммами тока напряжения. Построение обычно значи-

ных векторов  $\frac{1}{Z} = y$  является также простейшее геом. место. Действительно, пусть, напр.,  $\vec{Z} = r + jk \cdot x$  (рис. 38а),

где  $k$  — числовой коэффициент, могущий меняться от 0 до  $\infty$ . Тогда:

$$\vec{y} = g - jb = \frac{1}{r + jkx} = \frac{r - jkx}{r^2 + k^2x^2}$$

Нетрудно показать (рис. 38), что конец вектора  $\vec{I}$  перемещается по окружности, проходящей через начало векторов и

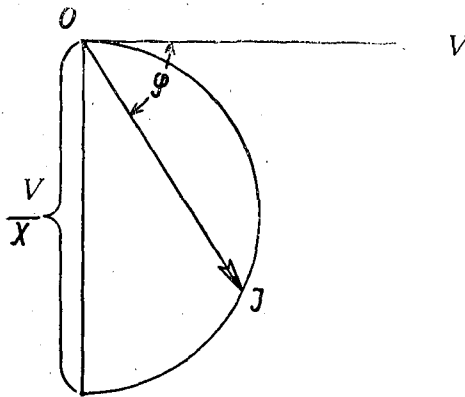


Рис. 38.

имеющей диаметр, направленный по оси  $r$  и равный  $\frac{1}{r}$ ; действительно при  $k=0$ ,  $y=g$  и  $k=\infty$  вектор  $y$  имеет максимальную величину  $= \frac{1}{r}$ ; что геометрическим местом, концом векто-

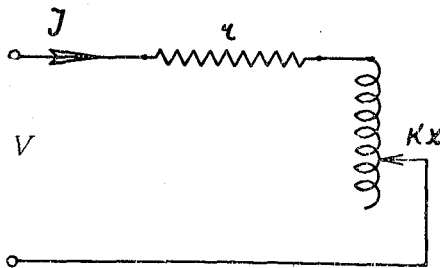


Рис. 38а.

ров  $y$  является окружность, следует из того соображения, что величина

$$\begin{aligned} & \sqrt{\left(g - \frac{1}{2r}\right)^2 + b^2} = \\ & = \sqrt{\left(\frac{r}{r^2 + k^2x^2} - \frac{1}{2r}\right)^2 + \left(\frac{k^2x^2}{(r^2 + k^2x^2)^2}\right)^2} = \\ & = \sqrt{\frac{(r^2 - k^2x^2)^2 + 4r^2k^2x^2}{2r(r^2 + k^2x^2)}} \end{aligned}$$

есть величина постоянная, равная

$$\sqrt{\frac{1}{2r}}$$

Так как сила тока  $\vec{I} = \vec{U} \cdot \vec{y}$ , то эта окружность является в другом масштабе круговой диаграммой тока.

Подобным же образом можно показать, что для схемы, изобр. на (рис. 39а)

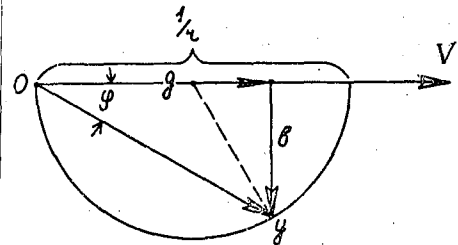


Рис. 39.

где  $Z = kr + jx$ , круговая диаграмма тока имеет вид окружности (рис. 38) с диаметром, расположенным перпендикулярно оси  $U$  и равным  $\frac{U}{x}$ .

Пользуясь графическим методом инверсии, можно проследить за изменением любой величины, характеризующей цепь переменного тока. Так, напр.,

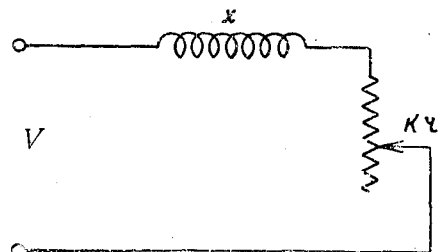


Рис. 39а.

активная мощность, поступающая из сети и равная  $P = V \cdot I \cos \varphi$ , определяется в некотором масштабе отрезком ординаты соответствующей точки на окружности. Мощность  $I^2r$ , израсходованная в каком-либо добавочном сопротивлении (потеря мощности), выражается через первые степени активной  $I_a$  и реактивной  $I_s$  слагающих силы тока. Действительно, уравнение круговой диаграммы в общем случае может быть выражено следующим образом:

$$(I_a - a)^2 + (I_s - b)^2 = R^2,$$





если  $m$  — предыдущий масштаб для  $u$ . Это значит, что если 1 мм на чертеже соответствует  $m \Omega$  проводимости, то тот же 1 мм будет соответствовать  $n = E \cdot m$  ампер силы тока. По окончании построения нужно найти рабочую часть диаграммы, т.е. часть, соответствующую изменению  $R$  от 0 до  $\infty$  (от холостого хода до короткого замыкания). Мощность, поступившая в цепь, за вычетом потери в сопротивл.  $r$ , отсчитывается тоже от прямой, определяемой двумя точками на окружности, при которых эта мощность равна нулю. Лакур показал, что эту мощность надо отсчитывать по направлению линии касательной к окружности в точке холостого хода  $R_0 = \infty$ .

**Многофазные системы.** Если в якоре генератора переменного тока разделить

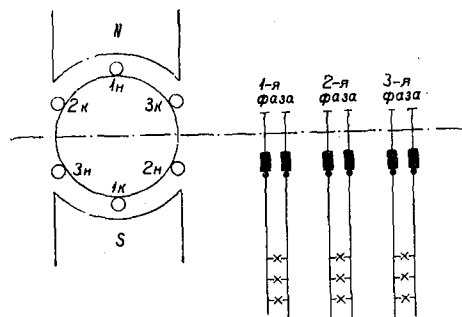


Рис. 41.

обмотку на несколько частей, смещенных в магнитном поле, то каждая часть может быть источником однофазного переменного тока. (рис. 41). Напряжения, которые получаются в отдельных частях, будут иметь одно и то же число периодов и будут различаться лишь по фазе. Такую систему называют вообще многофазной системой. Для отдельных частей этой системы, состоящих каждая из источника тока, проводов и нагрузки, часто употребляют не вполне правильное название — „фаза“.

Различаются следующие виды многофазной системы: 1) симметричные и несимметричные системы; 2) связанные и несвязанные; 3) уравновешенные и неуравновешенные.

Многофазная система является симметричной, когда во всех ее отдельных фазах действуют эдс одной и той

же амплитуды, но сдвинутые в двух соседних фазах на один и тот же угол, равный  $\frac{2\pi}{m}$ , где  $m$  — число фаз. Число проводов в несвязанной системе равно  $2m$ . Можно уменьшить вдвое это число проводов, если осуществить соединительные фаз многофазной системы многоугольником или звездой (рис. 42). Соеди-

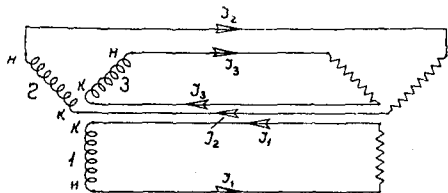


Рис. 42.

нение звездой получается, если соединить все обратные провода в один, называемый нейтральным. При этом в случае симметричной 3-х и более фазной системы в генераторе и в приемнике ток в нейтральном проводе равен нулю:

$$\sum_{n=1}^{n=m} I_n e^{j \frac{2\pi n}{m}} = 0.$$

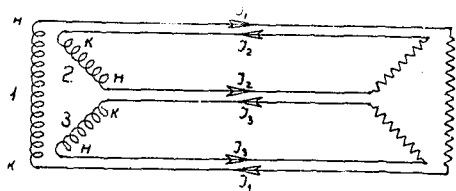


Рис. 43.

Напряжение между фазами при соединении звездой равно геометрической разности фазовых напряжений:

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \vec{E}_n - \vec{E}_{n-1} = E_\Phi \left( e^{j \frac{2\pi n}{m}} - e^{j \frac{2\pi(n-1)}{m}} \right) = \\ &= \vec{E}_\Phi e^{j \frac{2\pi(n-0,5)}{m}} \left( e^{j \cdot 0,5 \frac{2\pi}{m}} - e^{-j \cdot 0,5 \frac{2\pi}{m}} \right) = \\ &= 2 \vec{E}_\Phi \sin \frac{1}{2} \frac{2\pi}{m} \cdot j \cdot e^{j \frac{2\pi(n-0,5)}{m}}. \end{aligned}$$

В трехфазной системе ( $m = 3$ ) междуфазовое напряжение равно по величине

$$E = 2 E_\Phi \sin 60^\circ = \sqrt{3} E_\Phi,$$

и по фазе смещено на угол  $30^\circ$  по отношению к  $E_n$ :

$$j e^{j \frac{2\pi(n-0,5)}{m}} : e^{j \frac{2\pi n}{m}} = j e^{-j \frac{\pi}{m}} = e^{j \frac{\pi}{6}}.$$

Соединение многоугольником получается, когда прямой провод одной фазы соединяется вместе с обратным проводом смежной фазы (рис. 42). В соединении замкнутым многоугольником сумма фазных напряжений равна нулю:

$$\sum_{n=1}^{n=m} E_n \cdot e^{j \frac{2\pi n}{m}} = 0.$$

Сила тока в подходящем проводе равна разности токов в фазах:

$$\vec{I} = \vec{I}_n - \vec{I}_{n-1} = 2 I_\phi \sin \frac{1}{2} \cdot \frac{2\pi}{m} \cdot j \cdot e^{2\pi \cdot j \left( \frac{n-0,5}{m} \right)}.$$

Для трехфазного тока, при соединении треугольником (рис. 43):

$$I = 2 I_\phi \sin \frac{1}{2} \frac{2\pi}{3} = \sqrt{3} I_\phi.$$

Мощность симметричной многофазной системы, в противоположность однофазной, не зависит от времени и является величиной постоянной, равной:

$$P = m E_\phi I_\phi \cos \varphi,$$

где  $E_\phi$  и  $I_\phi$  — фазовые величины, а  $\varphi$  — сдвиг фаз между ними.

В случае трехфазной системы:

$$P = 3 E_\phi I_\phi \cos \varphi,$$

или

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

где  $E$  и  $I$  межфазовые величины, а  $\varphi$  — попережнему сдвиг фаз между фазовыми  $E_\phi$  и  $I_\phi$ .

При измерении мощности трехфазной системы большей частью пользу-

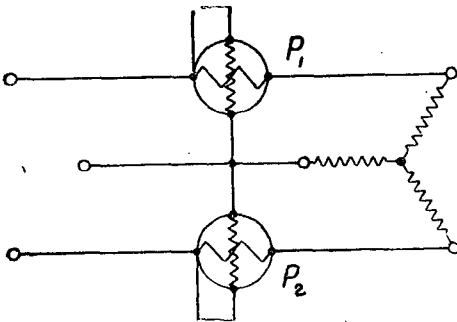


Рис. 44.

ются схемой Арона (фиг. 44). Векторная диаграмма этой схемы приведена на фиг. 45.

Измеряемые токи  $I_1$  и  $I_2$  сдвинуты на углы  $\varphi$  от соответствующих фазовых напряжений  $E_1$  и  $E_2$  (рис. 45). Измеряемые линейные напряжения будут  $\vec{E}_1 - \vec{E}_3 = -\vec{E}_{31}$  и  $\vec{E}_2 - \vec{E}_3 = \vec{E}_{23}$ . Вектор  $-E_{31}$  отстает от  $I_1$  на угол  $(\varphi_1 - 30^\circ)$ , вектор  $E_{23}$  опережает  $I_2$  на  $(\varphi_2 + 30^\circ)$ . Поэтому ваттметры будут показывать следующие мощности:

$$P_1 = -E_{31} \cdot I_1 \cos (\varphi_1 - 30^\circ)$$

$$P_2 = E_{23} \cdot I_2 \cos (\varphi_2 + 30^\circ),$$

где  $E_{31} = E_{23} = \sqrt{3} \cdot E_\phi$ . Если  $\varphi = 60^\circ$ , то  $P_2 = 0$ , если  $\varphi > 60^\circ$ , то показание второго ваттметра также будет отрица-

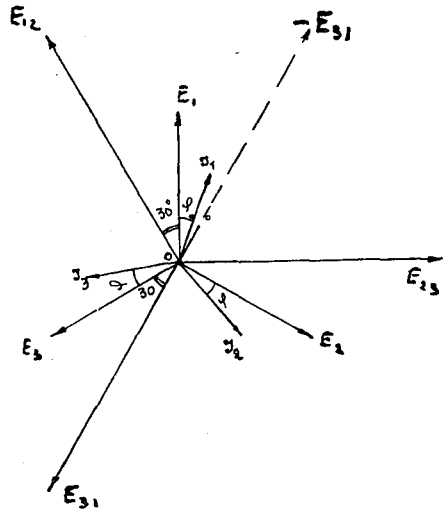


Рис. 45.

тельным. Для возможности отсчета у односторонних ваттметров делают переключение зажимов. При одинаковой нагрузке всех фаз сумма показаний ваттметров даст общую мощность:

$$\begin{aligned} |P_1| + P_2 &= E \cdot I [\cos (\varphi - 30^\circ) + \cos (\varphi + 30^\circ)] = E \cdot I \cdot 2 \cos 30^\circ \cos \varphi = \\ &= \sqrt{3} E \cdot I \cdot \cos \varphi; \end{aligned}$$

при  $\varphi > 60^\circ$  надо взять разность  $|P_1| - P_2$ ; так как, далее, при  $\varphi < 60^\circ$

$$\begin{aligned} |P_1| - P_2 &= E \cdot I [\cos (\varphi - 30^\circ) - \cos (\varphi + 30^\circ)] = E \cdot I \cdot 2 \sin 30^\circ \sin \varphi = \\ &= E \cdot I \cdot \sin \varphi, \end{aligned}$$

то

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{|P_1| - P_2}{|P_1| + P_2},$$

т.е. по показаниям двух ваттметров можно определить угол сдвига фаз.

Интересно, что по построению формулы не требуется знать цену делений этих двух ваттметров, если только они одинаковы (она сокращается). Для установления знака у  $P_2$  лучше всего предварительно испробовать схему на заведомо омической или чисто индуктивной нагрузке.  $P_1$  относится к ваттметру с большим показанием, если  $\varphi$  лежит

при этом соединении звездой (рис. 47а) может быть приведено к треугольнику (рис. 47) и наоборот на основании нижеследующих ур-ий:

$$\Delta \text{ приводится к } \Lambda$$

$$\vec{Z}_1 + \vec{Z}_2 = \frac{(\vec{Z}_a + \vec{Z}_b) \vec{Z}_c}{\vec{Z}_a + \vec{Z}_b + \vec{Z}_c}$$

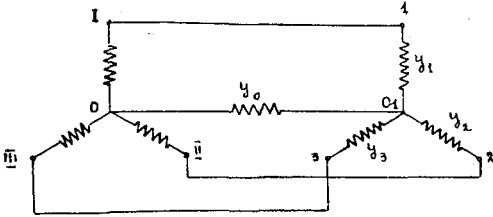


Рис. 46.

между  $0$  и  $+90^\circ$ . Когда  $-90^\circ < \varphi < 0$  или  $\varphi > 90^\circ$  (напр., при параллельной работе синхр. машин), ваттметры в этом смысле меняются ролями.

В случае неравномерной нагрузки трехфазной системы (рис. 46) задача о распределении токов и напряжений

$$\Lambda \text{ приводится к } \Delta$$

$$\vec{y}_a + \vec{y}_b = \frac{(\vec{y}_1 + \vec{y}_2) \vec{y}_3}{\vec{y}_1 + \vec{y}_2 + \vec{y}_3}$$

которые могут быть продолжены циклической перестановкой индексов.

Когда нагрузкой являются вращаю-

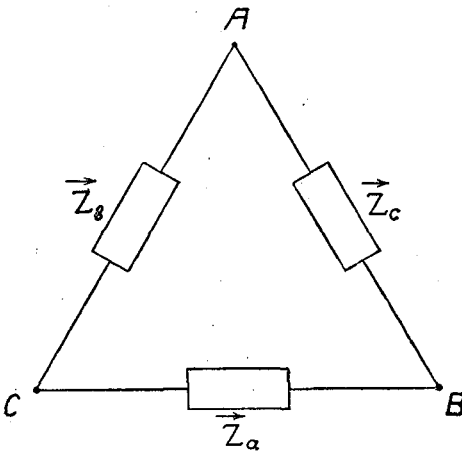


Рис. 47.

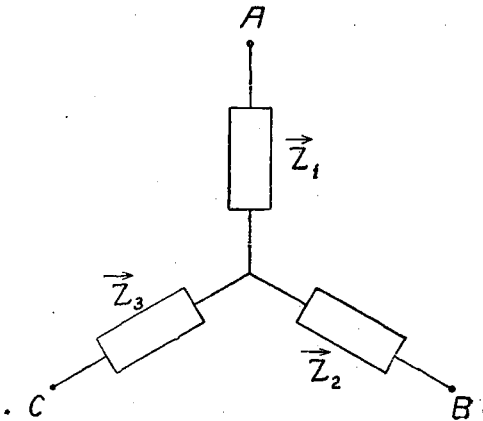


Рис. 47а.

в отдельных фазах при соединении звездой в общем сводится к составлению следующих ур-ий:

$$\vec{E}_1 = \vec{I}_1 Z + \vec{I}_1 Z_1 + \vec{I}_0 Z_0$$

$$\vec{E}_2 = \vec{I}_2 Z + \vec{I}_2 Z_2 + \vec{I}_0 Z_0$$

$$\vec{E}_3 = \vec{I}_3 Z + \vec{I}_3 Z_3 + \vec{I}_0 Z_0;$$

щиеся электрические машины, то в последних под влиянием симметричной системы многофазного (в частном случае трехфазного) тока возникает вращающееся магнитное поле с индукцией:

$$B_x = \frac{m}{2} B_m \cos\left(\frac{x}{\tau} \pi - \omega t\right).$$

Однако, такое поле получается только при симметричной системе напряжений.

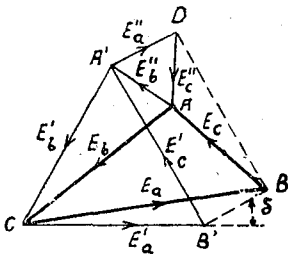


Рис. 48.

При несимметричной системе появляется т. наз. обратное паразитное поле. Для определения значения последнего разлагают несимметричную многофазную систему на две симметричные системы с противоположным чередованием фаз, при чем большая из них сохраняет первоначальное чередование. На рис. 48 показано сперва сложение двух симметричных систем:

$$\begin{aligned} \vec{E}_a &= \vec{E}'_a + \vec{E}''_a \\ \vec{E}_b &= \vec{E}'_b + \vec{E}''_b \\ \vec{E}_c &= \vec{E}'_c + \vec{E}''_c \end{aligned}$$

На рис.  $E''_a = B'B$  опережает  $E'_a$  на угол  $\delta$ . Так что:

$$\begin{aligned} \vec{E}'_a &= E'_a; & \vec{E}''_a &= E''_a e^{j\delta} \\ \vec{E}'_b &= E'_a e^{-j\frac{2\pi}{3}}; & \vec{E}''_b &= E''_a e^{j(\delta + \frac{2\pi}{3})} \\ \vec{E}'_c &= E'_a e^{+j\frac{2\pi}{3}}; & \vec{E}''_c &= E''_a e^{j(\delta - \frac{2\pi}{3})} \end{aligned}$$

При этом суммы:  $\vec{E}'_a + \vec{E}'_b + \vec{E}'_c$ ;  $\vec{E}''_a + \vec{E}''_b + \vec{E}''_c$  в отдельности равны нулю. Если же помножить  $\vec{E}'_b$  на  $e^{j\frac{2\pi}{3}}$ , а  $\vec{E}'_c$  на  $e^{-j\frac{2\pi}{3}}$  и сложить их с  $\vec{E}'_a$ , то мы получим:

$$\vec{E}'_a + \vec{E}'_b e^{j\frac{2\pi}{3}} + \vec{E}'_c e^{-j\frac{2\pi}{3}} = 3\vec{E}'_a$$

т. е. утроенный вектор  $\vec{E}'_a$  первой симметричной системы. Аналогично этому:

$$\vec{E}''_a + \vec{E}''_b e^{-j\frac{2\pi}{3}} + \vec{E}''_c e^{+j\frac{2\pi}{3}} = 3\vec{E}''_a$$

$$i = f(\omega t) = i_0 + i_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + i_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + i_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3) + \dots$$

Отсюда вытекают разные способы разложения несимметричной системы напряжения, например показанный на рис. 49.

В последнее время этот метод исследования приобрел очень важное значение для расчета токов короткого замыкания в электрических установках и выделился в самостоятельный под названием метод симметричных составляющих. При этом он обобщен также и на случай, когда система векторов  $E$  или  $I$  не замкнута, т. е.  $\sum E \neq 0$  или  $\sum I \neq 0$ . В этом случае выделяется вначале система т. наз. нулевой последовательности. Отношение между симметричными системами  $E$  и  $I$  соответствующих последовательностей приобретает смысл полных сопротивлений таких же последовательностей.

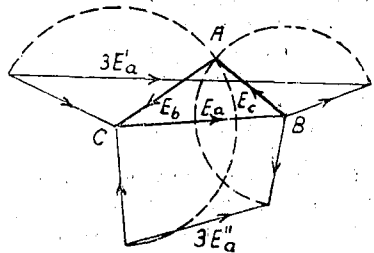


Рис. 49.

**Несинусоидальные токи.** На практике часто приходится иметь дело с кривыми тока и напряжения, более или менее отличающимися от синусоиды, но, однако, сохраняющими свой периодический вид. По Фурье, такие кривые надо представлять себе составленными из основной синусоидальной волны и синусоид более высокого числа периодов, называемых высшими гармоническими составляющими.

Ур-ие высшей гармонической  $n$ -го порядка имеет вид:

$$i_n = i_{nm} \sin(n\omega t + \psi_n);$$

здесь  $n$  — произвольное целое число,  $\omega$  — угловая частота основной волны,  $n\omega$  — угловая частота рассматриваемой высшей гармонической;  $i_{nm}$  — ее амплитуда и  $\psi_n$  — ее фазовый угол. Следовательно, ур-ие периодической кривой будет:

В технике сильных токов обычно  $i_0 = 0$ , и имеются только высшие гармонические нечетного порядка  $n = 1; 3; 5; 7; 9; 11 \dots$ . Вместо того, чтобы вводить

Фазовый угол  $\psi_n$ , можно каждую гармоническую разложить на две волны, сдвинутых друг относительно друга на четверть соответствующего периода и имеющих амплитуды  $a_n$  и  $b_n$ , удовлетворяющих следующим ур-ям:

$$i_{nm} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \quad \operatorname{tg} \psi_n = \frac{b_n}{a_n},$$

так что ур-ие периодической кривой получится в следующем виде:

$$i = \sum_1^n a_n \sin n \omega t + \sum_1^n b_n \cos n \omega t.$$

Для разложения периодической кривой тока или напряжения существует много разнообразных способов, использующих отдельные свойства такой кривой. Имеются также остроумные приборы — анализаторы, при помощи которых можно по форме кривой выделить высшие гармоники.

Здесь представляют интерес лишь два способа:

1. Основной аналитический способ, основанный на том, что среднее значение произведений ординат двух синусоид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin (nx + \psi_n) \sin kx \, dx &= \\ = 0 \text{ при } n \neq k &= \\ = \frac{1}{2} \cos \psi_n \text{ при } n = k, & \end{aligned}$$

т.е. равно нулю, если эти синусоиды разных чисел периодов, и равно полупроизведению амплитуд (равных в данном частном случае единице) на косинус угла сдвига фаз между синусоидами, если синусоиды одинакового числа периодов (см. вып. мощности переменного тока). Аналогично этому:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin (nx + \psi_n) \cos kx \, dx &= \\ = 0 \text{ при } n \neq k &= \\ = \frac{1}{2} \sin \psi_n \text{ при } n = k. & \end{aligned}$$

Находя интегралы

$$\int_0^{2\pi} f(x) \sin kx \, dx = \pi A_k \cos \psi_k$$

$$\text{и } \int_0^{2\pi} f(x) \cos kx \, dx = \pi A_k \sin \psi_k$$

для  $k = 1; 3; 5; 7; 9; 11$ ; и т. д., получают возможность отыскать амплитуды  $A_k$  и сдвиг фаз  $\psi_k$  для каждой отдельной гармоники.

Способ удобен, когда кривая тока или напряжения может быть выражена в простейшем аналитическом виде.

2. Во всех других случаях можно пользоваться способом Фишер-Гиннена, основанным на том, что если взять алгебраическую сумму  $k$  — ординат, расположенных через  $\frac{1}{k}$  часть целого периода кривой, то в этой сумме останутся только ординаты, относящиеся к синусоидам порядка кратного  $k$ , а ординаты всех остальных синусоид взаимно уничтожатся. Действительно, сложение ординат несинусоидальной кривой, которые также представляют собой суммы ординат составляющих синусоид, можно заменить геометрическим сложением векторов, изображающих эти синусоиды. Эти векторы вращаются с разной угловой скоростью. Так, напр., вектор 3-й гармоники вращается в 3 раза быстрее, чем вектор основной синусоиды; вектор 7-ой гармоники — в 7 раз и т. д.

Если мы складываем ординаты чрез  $\frac{1}{3}$  основного периода, то в этом случае векторы основной синусоиды будут расположены под углами  $120^\circ$  друг относительно друга; вектора 5-й гармоники под углами  $\frac{5 \cdot 2\pi}{3}$ , т.е.  $240^\circ$ ;

7-й гарм. —  $\frac{7 \cdot 2\pi}{3}$ , т.е.  $120^\circ$ . Так как

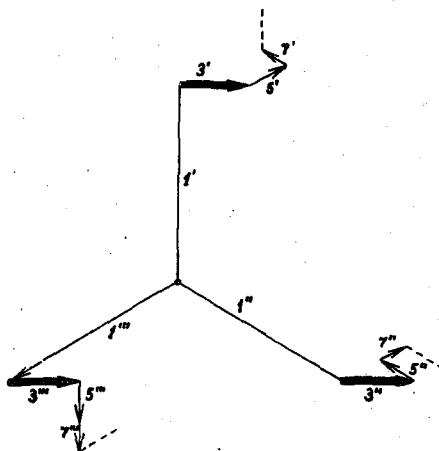


Рис. 50.

мы берем сумму трех ординат, то ясно, что при таком расположении дадут в

сумме нуль три вектора основной синусоиды, три вектора 5-ой, 7-ой, 11-ой и т. д. гармоник. Лишь векторы 3-ей, 9-ой и т. д. гармоник будут сдвинуты на целый собственный период, т. е. дадут тройную сумму значений своих ординат (рис. 50).

Так обр., деля графически основной период несинусоидальной кривой на 3; 5; 7; 9 и т. д. равных частей (рис. 51а), можно найти:

$$M_3 = y_3^I + y_3^{II} + y_3^{III} = 3(A_3 \sin \psi_3 + A_9 \sin \psi_9)$$

$$M_5 = y_5^I + y_5^{II} + y_5^{III} + y_5^{IV} + y_5^V = 5 A_5 \sin \psi_5$$

$$M_7 = 7 A_7 \sin \psi_7$$

$$M_9 = 9 A_9 \sin \psi_9 \text{ и т. д.,}$$

при чем ординаты  $y$  берутся, исходя из общей произвольной начальной точки  $t=0$  на оси абсцисс.

Так как этих ур-ий недостаточно для того, чтобы определить амплитуды  $A_k$  и фазы  $\psi_k$  отдельных гармоник, то смещают начальную точку (рис. 51а) на какой-либо известный фазовый угол — лучше всего на четверть основного периода ( $t_1 = \frac{T}{4}$ ) и производят опять такое же сложение ординат. Надо только учесть изменение знаков у ординат отдельных гармоник в соответствии с тем, что:

$$\sin \left( \frac{k 2\pi}{4} + \psi_k \right) = \sin \left( \frac{k\pi}{2} + \psi_k \right) = (-1)^{\frac{k-1}{2}} \cos \psi_k$$

при  $k$ —нечетном. Так что

$$N_3 = 3(-A_3 \cos \psi_3 + A_9 \cos \psi_9)$$

$$N_5 = 5 A_5 \cos \psi_5; N_7 = -7 A_7 \cos \psi_7$$

$$N_9 = +9 A_9 \cos \psi_9; N_{11} = -11 A_{11} \cos \psi_{11}$$

и т. д.

Высшие гармонические составляющие тока заглушаются при наличии в цепи индуктивности—кривая тока приближается к синусоиде. Наоборот, емкость резко искажает форму кривой тока—высшие гармонические (относительно)

усиливаются. На фиг. 52 показаны две кривые тока:  $i_L$  — при прохождении через катушку самоиндукции, и  $i_c$  — при прохождении чрез емкость при одной и той же кривой внешнего напряжения  $e$ .

При измерении несинусоидальных токов надо считаться с тем, что эффективное значение периодической силы тока, изменяющейся по произвольной кривой, равно корню квадратному из суммы квадратов эффективных значений отдельных гармоник:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots + I_k^2}$$

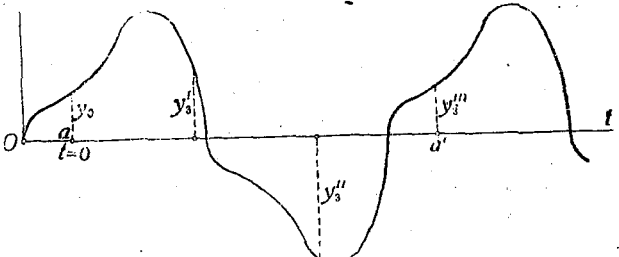


Рис. 51.

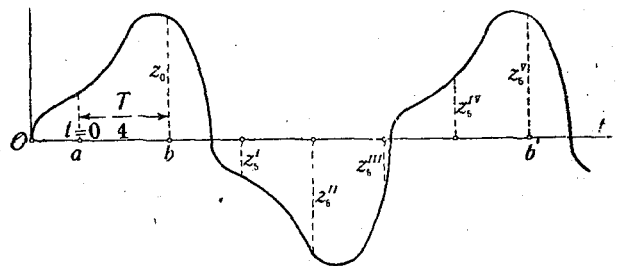


Рис. 51а.

В трехфазных системах особым свойством обладают гармонические составляющие, кратные 3-м. Так, при соединении звездой генератора в его линейном напряжении всегда отсутствуют гармонические составляющие, кратные 3-м, так как они взаимно вычитаются (фиг. 50). Наоборот, при соединении треугольником они складываются и дают в замкнутой обмотке тройную результирующую величину, вызывая уравнительный ток.

Явления в цепях с железом. Как было показано ранее (на стр. 254), при прохождении переменного тока,

по катушке самоиндукции в последней возникает реактивная эдс:

$$e = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Решение этого дифф. ур-ия легко приводит к ф-ле:

$$E = 4k f w \Phi_{\max} 10^{-8} \text{ вольт,}$$

где  $k$  — коэффициент формы кривой, равный для синусоиды  $\frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$ ;

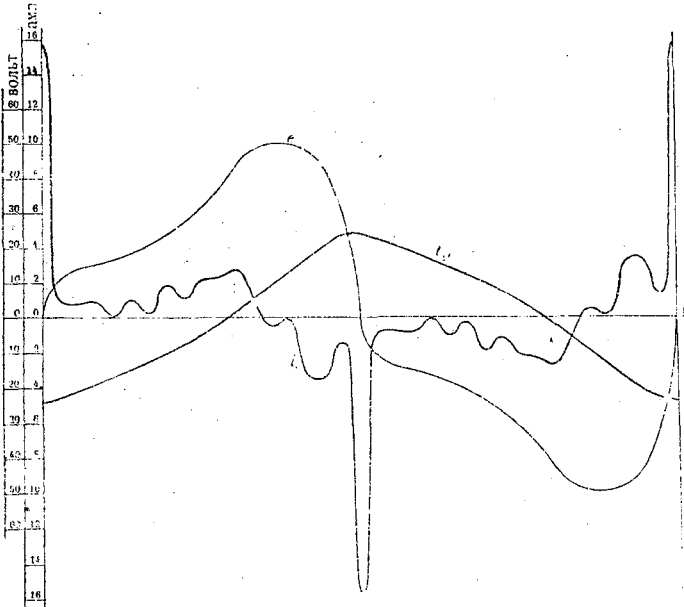


Рис. 52.

мы видим, что при данном числе витков  $w$  и числе периодов  $f$  эта эдс, которая должна быть почти равна по величине внешнему напряжению, тесно связана с величиной  $\Phi_{\max}$ . Но для образования последнего необходимо определенное значение намагничивающих ампервитков по ур-ию:

$$\Phi = \frac{iw}{R_{\mu}},$$

где  $R_{\mu}$  — магнитное

сопротивление, равное  $\frac{1}{0,4\pi \mu Q}$ , т.е. при данном числе витков необходимо опре-

деленное значение силы тока. Этот ток называется намагничивающим.

В Э. для уменьшения значения намагничивающего тока используют железные магнитопроводы, в которых магнитное сопротивление значительно меньше, чем в воздухе ( $\mu = 250 \dots 1000$ ).

При употреблении железа, однако, нужно считаться со следующими явлениями: а) кривая намагничивающего тока при синусоидальном напряжении

резко отстывает от синусоиды (и тем резче, чем больше насыщение железа); б) в железе возникают потери на гистерезис и токи Фуко; в) коэффициент самоиндукции будет переменной величиной, так как  $\mu = f(iw)$ , при чем среднее его значение будет падать по мере возрастания насыщения железа; г) возникающие в железе токи Фуко создают свои ампервитки, которые уменьшают магнитную индукцию в середине сечения железа.

На рис. 53 показано построение кривой силы тока при

данной кривой намагничивания железа. Построение сделано исходя из тогоображения, что при синусоидальном

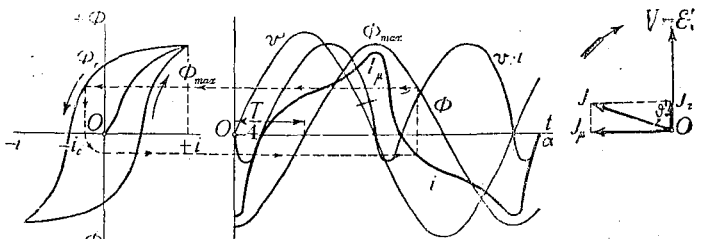


Рис. 53.

напряжении  $E$  поток  $\Phi$  должен иметь также синусоидальное изменение по времени. В силу этого намагничиваю-



щий ток должен быть несинусоидальным, так как между ним и магн. потоком нет прямой пропорциональности. Мы видим, что в кривой тока присутствует ясно выраженная третья гармоническая составляющая. Чтобы нанести такой намагничивающий ток на векторную диаграмму, заменяют его кривую эквивалентной синусоидой с тем же эффективным значением. Указанное построение, однако, не учитывало явления гистерезиса, состоящего в том, что перемагничение железа происходит с некоторым запаздыванием по отношению к фазе намагничивающих ампервитков.

Если бы между индукцией  $B$  и напряженностью поля  $H = 0,4\pi ni$  не было сдвига фаз, то затрачиваемая на намагничивание объема  $v$  энергия, равная

$$v \int_0^B \frac{HdB}{4\pi} = f(B).$$

возвращалась бы за каждый период обратно. В действительности же часть этой энергии остается в железе в виде потерь на гистерезис, которые выражаются  $\phi$ -лой:

$$P_h = \eta \cdot f B_{max}^{\delta} \cdot 10^{-7} \frac{\text{ВАТТ}}{\text{ДМ}^3},$$

при чем по Штейнметцу (для  $B < 10000$ )  $\delta = 1,6$ , а опытный коэффициент  $\eta$  в зависимости от сорта железа колеблется от 1 до 5. По Рихтеру (для  $B >$

$$P = P_h + P_f = \left[ \sigma_h \cdot \frac{f}{100} + \sigma_f \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] \left[ \frac{B}{10000} \right]^2 \frac{\text{ватт}}{\text{кг}}.$$

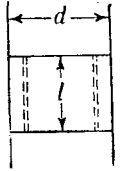
При этом коэффициенты  $\sigma_h$  и  $\sigma_f$  принимаются равными: для обыкновенного железа —  $\sigma_h = 4,4 \cdot 4,8$ ;  $\sigma_f = 22 \cdot 25$ ; для легированного железа —  $\sigma_h = 2,4 - 3$ ,  $\sigma_f = 4,8 \cdot 5$ . Разделив вычисленные т. обр. потери на приложенное напряжение, находят активную слагающую намагничивающего тока и суммируют ее геометрически с вектором указанной эквивалентной синусоиды реактивной слагающей.

То обстоятельство, что коэффициент самоиндукции катушки с железом меняется в зависимости от степени насыщения, приводит к следующему

$> 10000$ )  $\delta = 2$ , а  $\eta = 0,2 \cdot 1$ . Для удобства вычислений  $\phi$ -ле придают вид:

$$P_h = \sigma_h \left( \frac{f}{100} \right) \left( \frac{B}{10000} \right)^2 \frac{\text{ВАТТ}}{\text{кг}}.$$

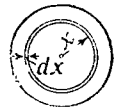
Потери на токи Фуко в круглом проводе складываются из потерь по каждому элементарному контуру диаметром  $x$  (рис. 54),



равных  $\frac{E_x^2}{R_x}$ ; так как  $E_x =$

$$= 4 \cdot \kappa \cdot f \cdot \Phi_x \cdot 10^{-8},$$

$$\text{а } \Phi_x = \pi x^2 B \text{ и } R_x = \rho l \frac{2\pi x}{dx},$$



где  $\rho$  — удельное сопротивление в  $1 \text{ см}^3$  объема провода, то:

Рис. 54.

$$P_f = \int_0^d \frac{16 \kappa^2 f^2 \pi^2 x^4 B_{max}^2 10^{-16} dx}{\rho 2\pi x} = \frac{1}{2\rho} \kappa^2 f^2 d^2 B_{max}^2 10^{-16} \left( l \frac{\pi d^2}{4} \right) = \frac{2}{3} f^2 d^2 B_{max}^2 10^{-13} \frac{\text{ВАТТ}}{\text{см}}$$

Такая же  $\phi$ -ла получается и для железных листов прямоугольного сечения.

Для удобства вычисления  $\phi$ -ле придают вид:

$$P_f = \sigma_f \left( \Delta \frac{f}{100} \right)^2 \left( \frac{B}{10000} \right)^2 \frac{\text{ВАТТ}}{\text{кг}}.$$

Здесь  $\Delta$  — толщина листов железа в мм. Обычно оба выражения потерь на гистерезис и на токи Фуко объединяются в одну  $\phi$ -лу:

явлению в цепи последовательного соединения самоиндукции и емкости. Если в схеме (рис. 55) начать постепенно повышать внешнее напряжение от 0, то сила тока также будет возрастать. Однако, в то время, как напряжение на обкладках конденсатора  $\vec{E}$  будет увеличиваться по прямой  $\vec{OD}$  (рис. 55), напряжение у катушки будет зависеть от насыщения и расти по кривой  $\vec{OB}$ . Результирующее напряжение  $(V_L - V_C)$ , равное внешнему, будет идти по кривой  $\vec{OA}$ .

Когда внешнее напряжение достигнет значения, соответствующего орди-

нате  $I_A$ , то мы попадаем в неустойчивую зону кривой  $OA$ , сила тока внезапно возрастает до значения  $OI'$ ; при этом напряжение на конденсаторе станет

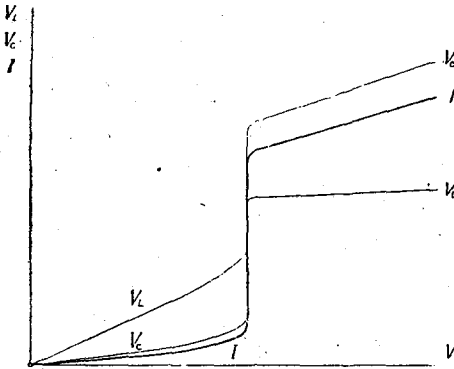


Рис. 55в.

больше, чем у катушки, и сила тока изменит на  $180^\circ$  свою фазу по отношению к внешнему напряжению.

Распределение индукции в железном цилиндре, вдоль оси которого проходит переменный магнитный поток (рис. 56),

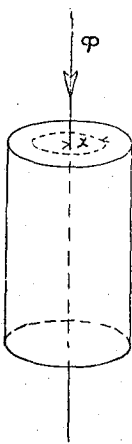


Рис. 56.

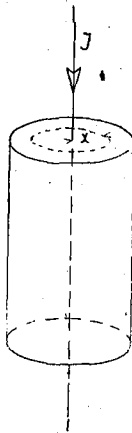


Рис. 57.

а также плотности тока в проводе (рис. 57), подчиняются ур-ям:

$$\frac{d^2 B}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dB}{dx} = \frac{0.4\pi\rho}{\rho \cdot 10^8} \frac{dB}{dt}$$

$$\frac{d^2 i_s}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{di_s}{dx} = \frac{0.4\pi\rho}{\rho \cdot 10^8} \frac{di_s}{dt}$$

Решения этих ур-ий будут:

$$\vec{B} = A_1 I_0 (x \sqrt{\alpha} \sqrt{-j}) e^{j\omega t}$$

$$\vec{i}_s = A_2 I_0 (x \sqrt{\alpha} \sqrt{-j}) e^{j\omega t}$$

где  $\alpha = \frac{0.4\pi\rho\omega}{\rho \cdot 10^8}$ ,  $A_1$  и  $A_2$  — постоянные, зависящие от пограничных условий;

$$\vec{I}_0 (x \sqrt{\alpha} \sqrt{-j}) = 1 + j \frac{x^2 \alpha}{2^2 \cdot 1^2} - \frac{x^4 \alpha^2}{2^4 (1.2)^2} - j \frac{x^6 \alpha^3}{2^6 (1.2 \cdot 3)^2} + \frac{x^8 \alpha^4}{2^8 (1.2 \cdot 3 \cdot 4)^2} \dots$$

Последнее выражение есть Бесселева функция первого рода нулевого порядка, которая в данном случае может быть представлена в виде:

$$I_0 (x \sqrt{\alpha} \sqrt{-j}) = ber(x \sqrt{\alpha}) + j bei(x \sqrt{\alpha}),$$

где

$$ber(x \sqrt{\alpha}) = 1 - \frac{x^4 \alpha^2}{2^2 \cdot 4^2} + \frac{x^8 \alpha^4}{2^4 \cdot 4^2 \cdot 6^2 \cdot 8^2} \dots$$

$$bei(x \sqrt{\alpha}) = \frac{x^2 \alpha}{2^2} - \frac{x^6 \alpha^3}{2^4 \cdot 6^2} + \frac{x^{10} \alpha^5}{2^6 \cdot 4^2 \cdot 6^2 \cdot 8^2 \cdot 10^2} \dots$$

Таблица функций  $ber\ x$  и  $bei\ x$

x	ber x	bei x
0,0	1,0000	0,0000
0,5	0,999	0,0625
1,0	0,9844	0,2496
1,5	0,9211	0,5576
2,0	0,7517	0,9723
2,5	0,3999	1,4571
3,0	-0,2214	1,9376
3,5	-1,1936	2,2833
4,0	-2,5634	2,2927
4,5	-4,2991	1,6859
5,0	-6,2301	0,1160
5,5	-7,9735	-2,7902
6,0	-8,8584	-7,3348
8,0	-20,9759	-35,0167
10,0	138,8405	56,3704
15,0	-2969,79	-2952,33
20,0	47583,7	11500,6
$\infty$	$\infty$	$\infty$

**Длинные линии.** В сетях высокого напряжения приходится учитывать емкостные явления, так как влияние емкости становится тем больше, чем выше или частота, или напряжение.

Между проводниками и между проводниками и землей образуется ток смещения, который в проводнике продолжается в виде тока проводимости, называемого зарядным (иногда емкостным) током. Так как емкость в сети является распределенной по длине так

же, как и самоиндукция, то сила тока в сети вблизи генераторов имеет иную величину, чем вдали от них. Падение напряжения от реакции самоиндукции и омического сопротивления обуславливает изменение напряжения в сети, что в свою очередь вызывает изменения величины зарядного тока. Образование электрического и магнитного полей связано с определенными потерями энергии, а именно: тепловыми потерями в проводе, потерями на вихревые токи в окружающих проводниках, потерями в различных диэлектриках, примененных в линии, потерями от несовершенства изоляции и потерями на корону.

Основными дифференциальными уравнениями распределения силы тока и напряжения вдоль линии передачи являются следующие ур-ия в символической форме:

$$d\vec{V} = \vec{I} \cdot \vec{z} \cdot dl$$

$$d\vec{I} = \vec{V} \cdot \vec{y} \cdot dl$$

Здесь  $\vec{z} = r + j\omega L$  — полное сопротивление одной единицы длины какого-либо участка сети;  $\vec{y}$  — полная проводимость единицы длины этого участка.

Для облегчения решения задачи рассматривают обыкновенно неразветвленную линию передачи, приводя ее к одной фазе системы; при этом  $\vec{z}$  и  $\vec{y}$ , а также  $r$  и  $L$ ,  $g$  и  $C$  считают по длине линии неменяющимися и относят их к одному километру линии.

Полным решением основных дифференциальных ур-ий будет:

$$\vec{V} = \vec{V}_2 \cos h \vec{v} l + \vec{I}_2 \vec{w} \sin h \vec{v} l,$$

$$I = \vec{I}_2 \cos h \vec{v} l + \frac{\vec{V}_2}{w} \sin h \vec{v} l.$$

Здесь:  $\vec{V}_2$  и  $\vec{I}_2$  — напряжение и сила тока в конце линии;  $\vec{v} = \sqrt{\frac{z}{y}}$ ; а

$\vec{w} = \sqrt{\frac{z}{y}}$  — так наз. „характеристика линии“, или „волновое сопротивление“.

Так обр., зная параметры линии  $r$ ,  $\omega$ ,  $g$  и  $b$ , а также нагрузку на конце линии  $V_2$  и  $I_2$ , можно найти по

приведенным ф-лам распределение напряжения  $V$  и силы тока  $I$  вдоль линии.

При вычислениях пользуются таблицей гиперболических функций, при чем следует иметь в виду, что:

$$\begin{aligned} \sin h \vec{v} l &= \sin h(a l \pm j \beta l) = \\ &= \sin h a l \cos \beta l \pm \cos h a l \cdot \sin \beta l; \\ \cos h \vec{v} l &= \sin h a l \cdot \cos \beta l \pm \\ &\pm j \cos h a l \cdot \sin \beta l, \end{aligned}$$

т.е. задача сводится к отысканию гиперболических функций  $\sin h a l$  и  $\cos h a l$  и круговых —  $\cos \beta l$  и  $\sin \beta l$ . При этом:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2}(zy - bx + rg)};$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2}(zy + bx - rg)}.$$

Если линия на конце разомкнута (холостой ход) и  $I_2 = 0$ , то на расстоянии  $l$  от конца линии:

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_2 \cos h \vec{v} l;$$

$$\vec{I}_0 = \frac{\vec{V}_2}{w} \sin h \vec{v} l.$$

Если, наоборот, линия на конце коротко замкнута ( $\vec{V}_2 = 0$ ), то для того, чтобы в конце была сила тока  $I_2$ , напряжение  $V_k$  и сила тока  $I_k$  на расстоянии  $v$  от конца линии должны быть равны:

$$\vec{V}_k = \vec{I}_2 w \sin h \vec{v} l,$$

$$\vec{I}_k = \vec{I}_2 \cos h \vec{v} l.$$

Таким образом, мы видим, что  $V$  и  $I$  на расстоянии  $l$  от конца линии при нагрузке будут равны:

$$\vec{V} = \vec{V}_0 + \vec{V}_k,$$

$$\vec{I} = \vec{I}_0 + \vec{I}_k.$$

Обстоятельство очень важное при опытных исследованиях линий.

При помощи опыта холостого хода и короткого замыкания можно не только предопределить  $V$  и  $I$  в том месте, где произведены измерения, но и узнать все параметры линии  $r$ ,  $\omega$ ,  $g$  и  $b$ , а следовательно и распределение  $V$  и  $I$  вдоль нагруженной линии. Если вести счет от начала линии, то ур-ия для  $V$  и  $I$  получат вид:

$$\vec{V} = \vec{V}_1 \cos h \vec{v} l_1 - \vec{I}_1 w \sin h \vec{v} l_1,$$

$$\vec{I} = \vec{I}_1 \cos h \vec{v} l_1 - \frac{\vec{V}_1}{w} \sin h \vec{v} l_1.$$

Здесь  $V_1$  и  $I_1$  — напряжение и сила тока в начале линии, а  $l_1$  — расстояние от начала линии. — Пользуясь выражениями:

$$\sin h \vec{v} l = \frac{e^{\vec{v}l} - e^{-\vec{v}l}}{2}$$

$$\cos h \vec{v} l = \frac{e^{\vec{v}l} + e^{-\vec{v}l}}{2},$$

можно предшествующие ур-ия написать следующим образом:

$$\vec{V} = \frac{1}{2} \left[ (\vec{V}_1 - \vec{I}_1 w) e^{\vec{v}l} + (\vec{V}_1 + \vec{I}_1 w) e^{-\vec{v}l} \right]$$

$$\vec{I} = \frac{1}{2} \left[ \left( \vec{I}_1 - \frac{\vec{V}_1}{w} \right) e^{\vec{v}l} + \left( \vec{I}_1 + \frac{\vec{V}_1}{w} \right) e^{-\vec{v}l} \right].$$

Если взять бесконечно длинную линию, то  $\vec{V}$  и  $\vec{I}$  при  $l = \infty$  будут вследствие потерь исчезающе малы ( $V = 0$  и  $I = 0$ ).

Тогда  $\vec{V}_1 = \vec{I}_1 w$  и ур-ия получают вид:

$$\vec{V} = \vec{V}_1 e^{-\vec{v}l} \quad \text{и} \quad \vec{I} = \vec{I}_1 e^{-\vec{v}l} = \frac{\vec{V}_1}{w} e^{-\vec{v}l}.$$

Получаются т. наз. прямые волны напряжения и силы тока, т. е. идущие от начала к концу. Действительно:

$$\vec{V}_{np} = V_1 \cdot e^{j\omega t} \cdot e^{\alpha l} \cdot l^{-j\beta l} = V_1 e^{-\alpha l} \cdot e^{j(\omega t - \beta l)}$$

$$\vec{I}_{np} = \frac{\vec{V}}{w} = \frac{V_1}{w e^{-\beta l}} = \frac{V_1}{w} \cdot e^{-\alpha l} \cdot e^{j(\omega t - \beta l + \delta)},$$

при чем мгновенные значения

$$V_{np} = V_{1m} e^{-\alpha l} \sin(\omega t - \beta l_1)$$

$$i_{np} = \frac{V_{1m}}{w} e^{-\alpha l} \sin(\omega t - \beta l_1 + \delta)$$

являются в каждый момент синусоидальными функциями расстояния  $l_1$ . Начала синусоид, где  $v_{np} = 0$  и  $i_{np} = 0$ , перемещаются вдоль линии со скоростью

$v = \frac{l_1}{t} = \frac{\omega}{\beta}$ . В линии без потерь  $v = \frac{w}{V_{zy}} = \frac{w}{V_{xb}} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{V_{sp}}$ .

Если линия имеет ограниченную длину  $l_0$  и открыта на конце (холостой ход), то на этом конце происходит отражение волн. Отраженная волна накладывается на прямую, при чем первая движется обратно так же, как проходила бы она на продолжении линии за конец ее. Таким образом, расстоянию  $l_1$  от начала линии соответствует путь, прой-

денный отраженной волной, равный  $2l_0 - l_1$ . При этом волна напряжения отражается с тем же знаком, а волна силы тока — с обратным. Следовательно, напряжение  $\vec{V}_0$  (при холостом ходе) на расстоянии  $l_1$

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_1 e^{-\vec{v}l_1} + \vec{V}_1 e^{-\vec{v}(2l_0 - l_1)}.$$

Для  $l_1 = l_0$ , т. е. для конца линии, имеем

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_2 = 2 \vec{V}_1 e^{-\vec{v}l_0}.$$

Отсюда

$$\vec{V}_{10} = \frac{\vec{V}_2}{2} e^{\vec{v}l_0}.$$

Так что напряжение на расстоянии  $l_1$  от начала линии

$$\begin{aligned} V_0 &= \vec{V}_1 \left[ e^{-\vec{v}l_1} + e^{-\vec{v}(2l_0 - l_1)} \right] = \\ &= \vec{V}_2 \left[ e^{+\vec{v}(l_0 - l_1)} + e^{-\vec{v}(l_0 - l_1)} \right] = \vec{V}_2 \cos h \vec{v} l, \end{aligned}$$

где  $l$  — расстояние от конца. Сила тока  $I_0$  на расстоянии  $l_1$  равна:

$$\vec{I}_0 = \frac{\vec{V}_1}{w} e^{-\vec{v}l_1} - \frac{\vec{V}_1}{w} e^{-\vec{v}(2l_0 - l_1)}$$

Таким образом, на конце линии  $l_1 = l_0$ ,  $I_0 = 0$ .

Так как при холостом ходе  $\vec{V}_1 = \frac{\vec{V}_2}{2} e^{\vec{v}l_0}$ , то

$$\begin{aligned} \vec{I}_0 &= \frac{\vec{V}_2}{2w} \left[ e^{\vec{v}l_0} e^{-\vec{v}l_1} - e^{\vec{v}l_0} \cdot e^{-\vec{v}(2l_0 - l_1)} \right] = \\ &= \frac{\vec{V}_2}{w} \sin h \vec{v} (l_0 - l_1) = \frac{\vec{V}_2}{w} \sin h \vec{v} l. \end{aligned}$$

Аналогичным образом при коротком замыкании конца линии, когда волна напряжения отражается с обратным знаком, а волна тока с тем же, имеют место следующие соотношения:

$$\vec{V}_k = \vec{V}_1 e^{-\vec{v}l_1} - \vec{V}_1 e^{-\vec{v}(2l_0 - l_1)}$$

$$\vec{I}_k = \frac{V_1}{w} e^{-\vec{v}l_1} + \frac{V_1}{w} e^{-\vec{v}(2l_0 - l_1)};$$

при этом на конце линии  $l_1 = l_0$

$$\vec{V}_k = 0$$

$$\vec{I}_k = \frac{2V_1}{w} e^{-\vec{v}l_0}.$$

Для того, чтобы сила тока у коротко замкнутого конца равнялась после отражения  $I_2$ , необходимо, чтобы

$$\vec{V}_{1k} = \frac{I_2 w}{2} e^{\vec{v}l_0}.$$

Отсюда для  $\vec{V}_x$  и  $\vec{I}_x$  получаются выражения:

$$\begin{aligned} \vec{V}_x &= \vec{I}_2 w \sin h \sqrt{l} \\ \vec{I}_x &= \vec{I}_2 \cosh \sqrt{l} \end{aligned}$$

Исследование распределения силы тока и напряжения в длинных линиях может быть произведено опытами на т. наз. схемах замещения, т. е. таких искусственных схемах со сконцентрированными омическим сопротивлением, самоиндукцией и емкостью, в которых соотношения между напряжением и силой

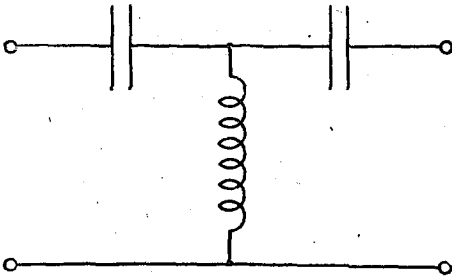


Рис. 58.

тока в начале и конце (по величине и фазе) соответствуют действительным соотношениям в линиях. Различают Т-образные и П-образные схемы замещения.

Описанная теория относится также ко всем другим случаям цепей с распределенными в той или иной степени равномерными постоянными — к так наз. цепным схемам, напр.: витки трансфор-

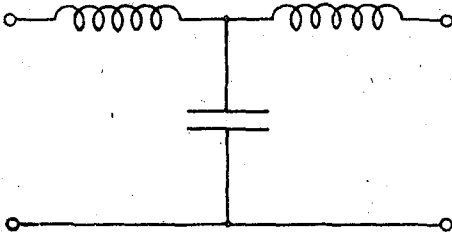


Рис. 58а.

маторов и электр. машин высокого напряжения с учетом емкости между витками и по отношению к корпусу, гирлянда изоляторов и т. п. Применяя описанные уравнения, можно произвести расчет электр. фильтров (рис. 58 и 58а), не пропускающих через себя токи заданной частоты.

Соотношение  $i = \frac{V}{w}$  позволяет решить задачу о переходе волны с одной линии на другую с различными характеристиками  $w_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$  и  $w_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}}$ .

Пусть, например,  $w_2 > w_1$ . Ток в другой линии не может быть равен току

$i_1 = \frac{v}{w_1}$ , а станет меньше. Избыток заряда пойдет на повышение напряжения  $V_2$  в точке перехода, которое становится общим для первой и второй линии. При этом:

$$\begin{aligned} V_2 &= V + (i_1 - i_2) w_1 \\ i_1 &= \frac{V_2}{w_2}; \text{ или } i_2 = \frac{2V}{w_1 + w_2}. \end{aligned}$$

Повышение напряжения и уменьшение тока в месте перехода, являющемся концом первой линии, распространяется к началу последней с такой же скоростью. Происходит, таким образом, отражение волн напряжения и силы тока. Отсюда получается решение для следующих частных случаев:

а) Однородная линия открыта на конце, т. е.  $w_2 = \infty$ ; на основании предыдущего  $i_2 = 0$ , а  $V_1 = 2v$ .

б) Линия коротко замкнута на конце:  $w_2 = 0$ ; естественно, что  $V_2 = 0$ ; так что

$$i_2 = \frac{2V}{w_1} = 2i_1.$$

Когда линия замкнута на конце на омическое сопротивление  $r_2$ , то

$$i_2 = \frac{2V}{w_1 + r_2}.$$

а

$$V_2 = i_2 r_2 = 2V \frac{r_2}{w_1 + r_2}.$$

Если  $r_2 > w_1$ , то  $V_2 > V$ ; наоборот, когда  $r_2 < w_1$ , тогда  $V_2 < V$ ; при  $r_2 = w_1$  и  $V_2 = V$ , т. е. отражения у конца линии не происходит и режим устанавливается сразу.

Если линия замкнута на самоиндукцию, то в первый момент после подхода волны напряжения и тока к концу  $i_2 = 0$  и  $V_2 = 2V$ ; затем наступает постепенное нарастание тока  $i_2$  по экспоненциальному закону:

$$i_2 = \frac{2V}{w_1} \left( 1 - e^{-\frac{w_1}{L_2} t} \right),$$

при чем  $V_2 = 2V \cdot e^{-\frac{w_1}{L_2} t}$ . В случае

включения на конце емкости в первый момент  $i_2 = \frac{2V}{w_1}$  и  $V_2 = 0$ , а затем  $i_2$  постепенно убывает по экспоненциальному закону:

$$i_2 = \frac{2V}{w_1} e^{-\frac{t}{w_1 C}}, \text{ а } v_2 = 2V \left( 1 - e^{-\frac{t}{w_1 C}} \right).$$

Когда на конце линии последовательно включены омическое сопротивление  $r$ , индуктивность  $L$  и емкость  $C$ , возможны случаи колебательного или аperiодического изменения  $i_2$  в зави-

симости от того, будет ли  $\left( \frac{r_2 + w_1}{2L_2} \right)^2$  больше или меньше  $\left( \frac{1}{L_2 C_2} \right)^2$ . При колебательном изменении:

$$i_2 = \frac{2V}{w_2 L_2} e^{-\frac{r_2 + w_1}{2L_2} t} \sin \omega_2 t$$

и  $V_2 = 2V - i_2 w_1$ , где  $\omega_2 = 2\pi f_2 = \sqrt{\left( \frac{1}{L_2 C_2} \right)^2 - \left( \frac{r_2 + w_1}{2L_2} \right)^2}$ .

Если период колебания в цепи  $r_2, L_2$  и  $C_2$  равен времени прохождения четырехкратной длины линии, т.е.  $\frac{1}{C_2} = \frac{4l}{V}$ , то получается резонанс, приводящий к очень высоким перенапряжениям.

*Неустановившиеся явления в цепях с сосредоточенными постоянными.* Новое состояние, когда в цепи устанавливается ток, принужденно получающий то же число периодов гармонического изменения, как и внешнее приложенное напряжение, устанавливается не сразу. На переход от одного состояния к другому требуется некоторый промежуток времени (время перехода), пока энергии магнитного и электрического полей в цепи не получат значений, соответствующих новому состоянию. В течение времени перехода на последующий установившийся ток накладывается т. наз свободный ток <sup>1)</sup>. При этом следует различать гл. обр. два случая. Первый—когда цепь имеет незначительную в сравнении со скоростью распространения электрического тока

напряженность (цепи с сосредоточенными постоянными); при этом можно считать, что сила тока в каждый данный момент времени имеет во всех точках одно и то же значение. Поэтому здесь явления рассматриваются главным образом с точки зрения изменения состояния во времени. Во втором случае—протяженность цепи достаточно велика, как, например, уже рассмотренные выше длинные линии передачи энергии. Здесь уже изучение ведется с точки зрения движения по линии электромагнитной волны.

Для неразветвленной цепи, состоящей из последовательно соединенных омического сопротивления, самоиндукции и емкости, в любой момент времени, независимо от того, успел ли установиться режим или нет, внешнее напряжение распадается на три слагающих:

$$e = ir + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{c} \int idt.$$

В переходный период сила тока складывается из установившейся и свободной слагающих:  $i = i_{cr} + i_{cb}$ ; точно так же напряжение на обкладках конденсатора:  $v_c = v_{cr} + v_{cb}$ . Поэтому  $e = i_{cr} r +$

$$+ L \frac{di_{cr}}{dt} + \frac{1}{c} \int i_{cr} dt + i_{cb} r + L \frac{di_{cb}}{dt} + \frac{1}{c} \int i_{cb} dt.$$

Так как установившийся ток должен удовлетворять ур-ию:

$$e = i_{cr} r + L \frac{di_{cr}}{dt} + \frac{1}{c} \int i_{cr} dt,$$

то, следовательно,

$$i_{cb} r + L \frac{di_{cb}}{dt} + \frac{1}{c} \int i_{cb} dt = 0.$$

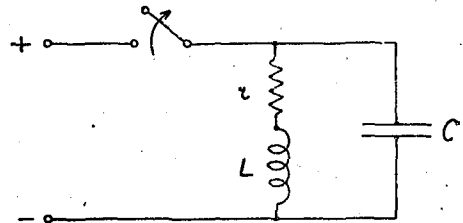


Рис. 59.

Если, например, в схеме, изображенной на рис. 59, разомкнуть рубильник, то в правой части цепи не будет действовать никакого внешнего напряжения. Однако, под влиянием самоиндукции и емкости в этой части возникнет сво-

<sup>1)</sup> Ранее называвшийся иногда экстратокком.

бодный ток, при чем он может быть аperiодического или колебательного характера и, вообще говоря, другого числа периодов, нежели принуждающее внешнее напряжение.

Продифференцировав один раз предыдущее ур-ие, мы получим после некоторого преобразования:

$$\frac{d^2 i_{св}}{dt^2} + \frac{r}{L} \frac{di_{св}}{dt} + \frac{1}{LC} i_{св} = 0.$$

Полным решением этого ур-ия является

$i_{св} = A \cdot e^{\gamma_1 t} + B e^{\gamma_2 t}$ , где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  — корни квадратного ур-ия  $\gamma^2 + \frac{r}{L} \gamma + \frac{1}{LC} = 0$ , так

что  $\gamma = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$ . Если  $\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC} > 0$ , то  $\gamma$  будет действительной величиной, и мы получим аperiодическое изменение свободного тока. Сюда относятся также и частные случаи, когда  $L = 0$  или  $C = \infty$ .

Если, наоборот,  $\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC} < 0$ , то  $\gamma$  — комплекс вида  $\alpha + \beta j$  и изменение свободного тока будет затухающим колебательным. Число периодов собственного колебания равно

$f_{св} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}$ , а множитель затухания

$$\alpha = \frac{r}{2L}.$$

Кривая  $\pm I_{1m} e^{-\alpha t}$  представляет собой огибающую, которая касается кривой тока.

В случае, когда  $C = \infty$ , т.е. когда конденсатор коротко замкнут, или, проще говоря, его нет, мы имеем аperiодическое изменение свободного тока по закону:

$$i_{св} = A_1 e^{\gamma t} = i_0 e^{-\frac{r}{L} t},$$

при чем множитель затухания в два раза больше, чем при колебательном изменении. Если при этом и  $r = 0$ , то  $i_{св} = i_0 = \text{пост.}$  Точно так же, когда  $L = 0$  1).

$$i_{св} = A_2 e^{\gamma t} = A_2 e^{-\frac{1}{rC} t}.$$

При рассмотрении затухания свободного тока удобнее пользоваться вели-

1) При  $L=0$  для  $\gamma$  получается неопределенное выражение  $\infty = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}$ , которое, после раскрытия неопределенности, дает для  $\gamma$  два корня:  $\gamma_1 = -\infty$  и  $\gamma_2 = -\frac{1}{rC}$ .

чиной обратной множителю затухания  $\alpha$ , называемой постоянной времени  $T$ . Таким образом,  $T = \frac{1}{\alpha}$ . Постоянная времени представляет собой подкасательную в начальной точке экспонен-

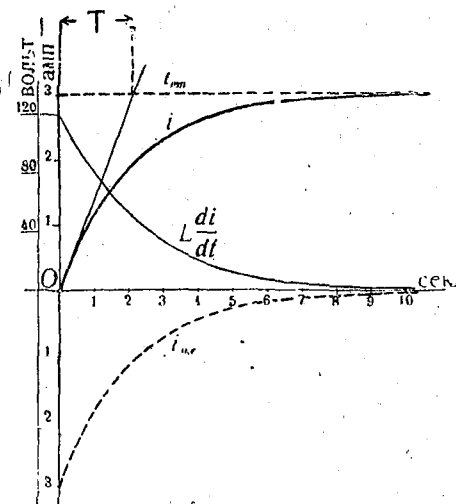


Рис. 60.

циальной кривой (рис. 60), каковой является кривая аperiодического свободного тока при  $L=0$  или  $C=\infty$ , а также огибающая колебательного свободного тока. Действительно:

$$\frac{i}{\frac{di}{dt}} = \frac{A \cdot e^{-\frac{t}{T}}}{\frac{1}{T} A \cdot e^{-\frac{t}{T}}} = T,$$

иными словами, постоянная времени является временем, в течение которого сила свободного тока уменьшается в  $e$  раз, т.е. в 2,718 раза. В то время как на характер изменения свободного тока или на число периодов его внешнее принуждающее напряжение почти не влияет, максимальная величина первого находится в полной зависимости от величины этого напряжения в момент включения, выключения или вообще какого-либо изменения. Так, при включении цепи, содержащей  $r$ ,  $L$  и  $C$ , на постоянное напряжение  $E$ , последующий установившийся ток  $i_{св}$  будет равен нулю, после того как зарядится конденсатор. Поэтому неустановившийся ток  $i = i_{св} + i_{св} = i_{св}$ . Далее, при  $t=0$ ,  $i = i_0 = 0$ , так что  $i = i_{св} = A + B = 0$ .

1-й случай:  $\frac{r^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$ ; здесь

$$i = i_{св} = A \left( e^{\gamma_1 t} - e^{\gamma_2 t} \right) =$$

$$= A \left( e^{-\frac{r}{2L} t} \cdot e^{j\omega_{св} t} - e^{-\frac{r}{2L} t} e^{-j\omega_{св} t} \right) =$$

$$= A e^{-\frac{r}{2L} t} \left( e^{j\omega_{св} t} - e^{-j\omega_{св} t} \right) =$$

$$= 2A e^{-\frac{r}{2L} t} j \sin \omega_{св} t.$$

За все время переходного процесса напряжение между обкладками конденсатора подчиняется у-рию:

$$i = -C \frac{dV_c}{dt} = i_{св}.$$

Поставим это выражение в у-рние:

$$\frac{d^2 i_{св}}{dt^2} + \frac{r}{L} \frac{d i_{св}}{dt} + \frac{1}{LC} i_{св} = 0.$$

Мы получим:

$$-C \frac{d^3 V_c}{dt^3} - \frac{r}{L} C \frac{d^2 V_c}{dt^2} - \frac{1}{LC} C \frac{dV_c}{dt} = 0,$$

или, после сокращения на  $-C$  и однократного интегрирования:

$$\frac{d^2 V_c}{dt^2} + \frac{r}{L} \frac{dV_c}{dt} + \frac{1}{LC} V_c = 0,$$

т.е. то же выражение, что и для  $i_{св}$ .

Для нахождения постоянной  $A$  в выражении  $i_{св}$  возьмем интеграл:

$$V_c = V_{ст} + V_{св} = -\frac{1}{C} \int i_{св} dt =$$

$$i_{св} = I_m e^{-\frac{r}{2L} t} \left[ -\frac{1}{\omega_{св} \omega \sqrt{LC}} \cos(\psi - \varphi) \sin \omega_{св} t + \frac{1}{\omega_{св} \sqrt{LC}} \sin(\psi - \varphi) \sin(\omega_{св} t - \arctg \frac{\omega_{св}}{\alpha}) \right]$$

(см. Круг, "Теор. осн. эл." или Френкель, "Теория перем. токов"), а напряжение на конденсаторе:

$$V_{св} = I_m e^{-\alpha t} \left[ -\frac{1}{\omega_{св} \omega C \sqrt{LC}} \cos(\psi - \varphi) \sin(\omega_{св} t + \arctg \frac{\omega_{св}}{\alpha}) + \frac{1}{\omega_{св} C} \sin(\psi - \varphi) \sin \omega_{св} t \right].$$

2-й случай:  $\frac{r^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$ . Здесь оба корня  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  действительны; так что

$$i_{св} = 2A e^{-\frac{r}{2L} t} \sin h \left( \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} t \right),$$

где  $A$  определяется из у-рия:

$$E = -\frac{A}{C} \cdot \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1 \gamma_2} = -\frac{A}{C} \frac{2\sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}}{\left(-\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = 2AL \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}},$$

т.е.:

$$A = \frac{E}{2L \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}}$$

Таким образом:

$$i_{св} = \frac{E}{L \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}} e^{-\frac{r}{2L} t} \sin h \left( \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} t \right).$$

Напряжение на конденсаторе изменяется по у-рию:

$$V_{св} = \frac{E}{2\sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}} \left[ \frac{r}{2L} \left( e^{\gamma_1 t} - e^{\gamma_2 t} \right) + \sqrt{\frac{r^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \left( e^{\gamma_1 t} - e^{\gamma_2 t} \right) \right].$$

$$= -\frac{A}{C} \int \left( e^{\gamma_1 t} - e^{\gamma_2 t} \right) dt =$$

$$= M - \frac{A}{C} \left( \frac{1}{\gamma_1} e^{\gamma_1 t} - \frac{1}{\gamma_2} e^{\gamma_2 t} \right).$$

При  $t = \infty$ , т.е., когда наступит установившийся режим, напряжение между обкладками конденсатора станет равным и противоположным внешнему напряжению  $-E$ . Поэтому

$$V_c = V_{ст} + V_{св} = M + 0 = -E.$$

Наоборот, в первый момент включения  $V_c = V_{ст} + V_{св} = -E + (E) = 0$ , т.е.

$$0 = -\frac{A}{C} \left( \frac{1}{\gamma_1} - \frac{1}{\gamma_2} \right) - E,$$

или

$$E = -\frac{A}{C} \cdot \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1 \gamma_2} = -\frac{A}{C} \cdot \frac{-2j\omega_{св}}{1} =$$

$$= A \cdot L \cdot 2j\omega_{св}.$$

Отсюда  $A = \frac{E}{2j\omega_{св} L}$ , так что окончательно

$$i_{св} = \frac{E}{\omega_{св} L} e^{-\frac{r}{2L} t} \sin \omega_{св} t;$$

при чем

$$V_{св} = \frac{E \cdot e^{-\alpha t}}{\omega_{св} \sqrt{LC}} \sin \left( \omega_{св} t + \arctg \frac{\omega_{св}}{\alpha} \right).$$

В случае, когда включение происходит на переменное внешнее напряжение  $E_m \sin \omega t$ , свободный ток получается равным:



В частном случае, когда  $C = \infty$ , свободный ток при включении получается равным: при постоянном токе  $i_{св} = -\frac{E}{r} e^{-\frac{r}{L}t}$ , при чем  $i = \frac{E}{r}(1 - e^{-\frac{r}{L}t})$ , а при  $r = 0$ ;  $i_{св} = \infty$  и  $i = \infty - \infty = \frac{E}{L}t$ ; при переменном токе:

$$i_{св} = -\frac{E_m}{z} \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{r}{L}t}$$

$$i = \frac{E_m}{z} \sin(\omega t + \psi - \varphi) - \frac{E_m}{z} \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{r}{L}t}$$

т.е. на установившийся переменный ток накладывается свободный ток, являющийся постоянным током, уменьшающийся по экспоненциальному закону  $(e^{-\frac{r}{L}t})$ .

Точно так же при  $L = 0$  свободный ток включения равен при постоянном токе:  $i_{св} = i = -\frac{E}{r} e^{-\frac{t}{rC}}$ , при чем  $V_{св} = E e^{-\frac{t}{rC}}$ ; при переменном токе

$$i_{св} = -\frac{E_m}{r} \sin \varphi \cos(\psi - \varphi) e^{-\frac{t}{rC}}$$

$$i = \frac{E_m}{z} \sin(\omega t + \psi + \varphi) - \frac{E_m}{r} \sin \varphi \cos(\psi + \varphi) e^{-\frac{t}{rC}}$$

при чем

$V_{св} = -E_m \sin \varphi \cos(\psi + \varphi) e^{-\frac{t}{rC}}$ . При выключении цепи, содержащей  $r, L$  и  $C$ , надо считать с тем, что магнитная энергия  $\frac{Li^2}{2}$ , запасенная в катушке самоиндукции к моменту выключения, должна частью израсходоваться в образующейся между контактами выключателя вольтовой дуге, а частью сосредоточиться в конденсаторе, при чем должен иметь место следующий энергетический баланс:

$$ei = i^2(r + r_g) + \frac{Li^2}{2} + \frac{Cv^2}{2}$$

Если выключение будет при  $i \neq 0$ , то оно не может быть мгновенным, так как  $e_s = -L \frac{di}{dt}$  было бы бесконечно большой величиной. Сопротивление возникающей поэтому дуги может быть приближенно принято в сумме с сопротивлением цепи, равным  $r_t = \frac{r}{1 - T}$ , где  $T$  —

время выключения; так что ур-ие для тока при выключении последовательной цепи  $r, L$  и  $C$  имеет следующий общий вид:

$$e = i \frac{r}{1 - T} + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt$$

Если бы при переменном токе можно было достигнуть того, чтобы с момента выключения ток дошел до своего ближайшего нулевого значения, изменяясь по той же синусоиде, как и до выключения, то напряжение выключения не было бы выше установившегося. При выключении цепи, содержащей, кроме самоиндукции, еще и емкость, надо считать с повторным зажиганием дуги, приводящим к тройному напряжению выключения.

Когда цепь содержит несколько электрически связанных контуров, то для рассмотрения неустановившегося процесса в такой цепи надо составить ряд ур-ий типа:

$$\Sigma e = i_1 r_1 + i_2 r_2 + i_3 r_3 + \dots + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + \dots + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt$$

для отдельных контуров, а также ур-ий типа  $\Sigma i = 0$  для узловых точек.

Решение ур-ий для неустановившегося тока можно провести и в символической форме. Действительно, частным решением ур-ия

$$e = ir + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt$$

является  $i = Ae^{\gamma t}$ ; но тогда

$$\frac{di}{dt} = \gamma Ae^{\gamma t} = \gamma i \quad \int i dt = \frac{Ae^{\gamma t}}{\gamma} = \frac{i}{\gamma}$$

так что можно написать:

$$e = ir + \gamma Li + \frac{i}{\gamma C}$$

при чем  $\gamma$  попрежнему должно удовлетворять ур-ию  $\gamma^2 + \frac{r}{L}\gamma + \frac{1}{LC} = 0$ ; откуда:  $\gamma = -\frac{r}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$ . Решение ур-ия  $e = ir + \gamma Li + \frac{i}{\gamma C}$  производится по ф-лам Хевисайда для постоянного внешнего напряжения:

$$i = \frac{E}{(N)_0} + \sum \left( \frac{Ee^{\gamma t}}{\gamma \frac{dN}{dt}} \right) \gamma_1, \gamma_2, \dots$$

и для переменного  $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$ ,  $i$  — мнимой части выр-ия:

$$\frac{E \cdot e^{j(\omega t + \psi)}}{(N)j\omega} + \sum \left[ \frac{E \cdot e^{j\omega t + j\psi}}{(\gamma - j\omega) \frac{dN}{d\tau}} \right] \gamma_1, \gamma_2 \dots$$

$$\text{В этих ф-лах } N = r + \gamma L + \frac{1}{\gamma C}; (N)_0 = r + OL + \frac{1}{OC}; (N)_{j\omega} = r + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}.$$

**Колебания в связанных цепях.** Связь между двумя цепями может быть осуществлена разным образом: чрез общую самоиндукцию, чрез общую емкость, общее омическое сопротивление, чрез взаимную индукцию или одновременно несколькими этими способами. Все случаи решаются так же как случай связи чрез взаимную индукцию. Благодаря магнитной связи коэффициенты затухания  $\alpha'$ ,  $\alpha''$  и угловые частоты  $\omega'$  и  $\omega''$  колебаний в обеих цепях становятся уже неравными тем, какие получаются при несвязанных свободных колебаниях:

$$\left( \alpha_{1,2} = \frac{r}{2L} \text{ и } \omega_{1,2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}} \right).$$

Дифф. ур-ия для обеих цепей будут:

$$i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_1} \int i_1 dt = 0$$

$$i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = 0.$$

Пользуясь выражениями:

$$i_1 = -C_1 \frac{dv_1}{dt}, \quad i_2 = -C_2 \frac{dv_2}{dt},$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — напряжения на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$ , получают общие решения приведенных ур-ий в следующем виде:

$V_1 = D_1 \cdot e^{(-\alpha' + j\omega')t} + F_1 e^{(-\alpha' - j\omega')t} + G e^{(-\alpha'' + j\omega'')t} + H_1 e^{(-\alpha'' - j\omega'')t}$ , где коэффициенты  $D, F, G$  и  $H$  определяются по начальным данным колебаний, а  $\alpha', \alpha''$  и  $\omega', \omega''$  определяются из следующих четырех ур-ий:

$$\alpha' + \alpha'' = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{1 - k^2}$$

$$\gamma'^2 + 4\alpha'\alpha'' + \gamma''^2 = \frac{\gamma_1^2 + 4\alpha_1\alpha_2 + \gamma_2^2}{1 - k^2}$$

$$\alpha'\gamma'^2 + \alpha''\gamma''^2 = \frac{\alpha_1\gamma_2^2 + \alpha_2\gamma_1^2}{1 - k^2}$$

$$\gamma'^2\gamma''^2 = \frac{\gamma_1^2\gamma_2^2}{1 - k^2}$$

Здесь  $k$  — коэфф. магнитной связи, рав-

$$\text{ный } \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}.$$

Для решения задачи о колебаниях в двух магнитно-связанных цепях удобно бывает воспользоваться также методом векторных диаграмм, если положить, что мы имеем дело с затухающими гармоническими колебаниями. В таком случае отдельные члены ур-ий

$$-M \frac{di_2}{dt} = i_1 r_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - v_1$$

$$-M \frac{di_1}{dt} = i_2 r_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - v_2$$

могут быть изображены в виде векторов, складываемых между собой геометрически. Действительно, величина  $x = X \cdot e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \psi)$  может быть представлена вектором  $\vec{ox}$ , вращающимся с угловой скоростью  $\omega$ , конец которого перемещается по логарифмической спирали. Ее первая производная, взятая с обратным знаком, может быть представлена вектором, равным по величине  $\sqrt{\alpha^2 + \omega^2} X$  и отстающим от вектора  $X$  на угол  $\alpha = \text{arctg} \frac{\omega}{\alpha}$ .

Литература: *Круг, К. А.*, „Основы электротехники“, т. I и II (1931—1932); *Черданцев, И. А.*, „Теория переменных токов“ (1933); *Миткевич, В. Ф.*, „Физические основы электротехники“ (1933); *Френкель, А.*, „Теория переменных токов“ (перев. с н.-м., 1933); *Видмар, М.*, „Научные основы электротехники“ (перев. с н.-м., 1932); „Справочник для электротехников“ (СЭТ), т. I (1928); *Ch. Steinmetz*, „Theoretical elements of Electrical Engineers“ (1924).

*Е. Нитусов.*

**II. Электрические измерения.** Измерение электрической величины есть сравнение ее значения с величиной того же рода, условно принятой за единицу (см. XIX, прил. единицы измерений, 6/8; *электричество, теоретические основы электротехники*, LI, 226). Электрические измерения могут выполняться при помощи электроизмерительных приборов или электроизмерительных устройств. Электроизмерительные приборы (подобно пружинным весам) непосредственно показывают значение измеряемой величины, а в электроизмерительных устройствах для той же цели предварительно необходимо посредством регулирования устройства создать электрическое равновесие (подобно весам с гирями).

Работа электроизмерительных приборов основана на использовании различных действий электрического тока. Магнитная стрелка вблизи провод-

ника с током отклоняется, стремясь стать перпендикулярно направлению проводника, т.е. так, чтобы ее магнитное поле совпало по направлению с магнитным полем проводника, и обратно: проводник с током, а тем более катушка, обтекаемая током, будет стремиться повернуться в магнитном поле так, чтобы направление ее собственного магнитного поля совпало с направлением основного магнитного поля, создаваемого постоянным магнитом.

Отклоняющая сила в этом случае зависит от силы тока в проводнике, а направление ее — от направления тока (правило левой руки). Указанное явление использовано в приборах магнитоэлектрической системы (рис. 1), в основном состоящих из постоянного стального магнита подковообразной формы

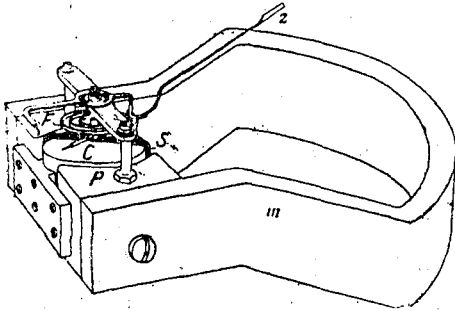


Рис. 1.

(*m*) и катушки (*s*), вращающейся между его полюсами; ток в катушку подводится через две спиральные пружины, закручивание которых создает силу, противодействующую вращению катушки. Приборы этой системы отличаются большой точностью показаний и высокой чувствительностью, благодаря чему они широко используются в качестве лабораторных приборов и чувствительных гальванометров (см. *гальванометр*), а также в качестве щитовых приборов постоянного тока. Так как отклоняющая сила в этих приборах зависит от направления тока, то они пригодны только для постоянного тока, что является их существенным недостатком.

Если поместить рядом с катушкой, обтекаемой током, кусок железа (*A*), то последний будет втягиваться катушкой (*B*) тем сильнее, чем больше сила тока.

На этом принципе основано устройство электромагнитного прибора с плоской катушкой (рис. 2). Электромагнитное действие тока может быть использовано в электроизмерительном приборе и несколько иначе: если внутрь катушки

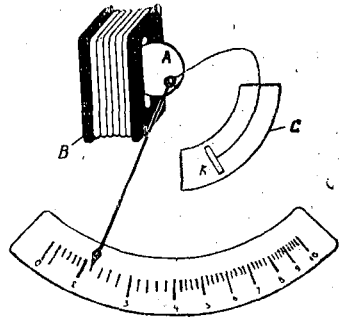


Рис. 2.

поместить два листа мягкого железа, из которых один закреплен на месте (*A*), а другой приспособлен для вращения (*B*) и связан со стрелкой, то, когда ток будет проходить по катушке, оба

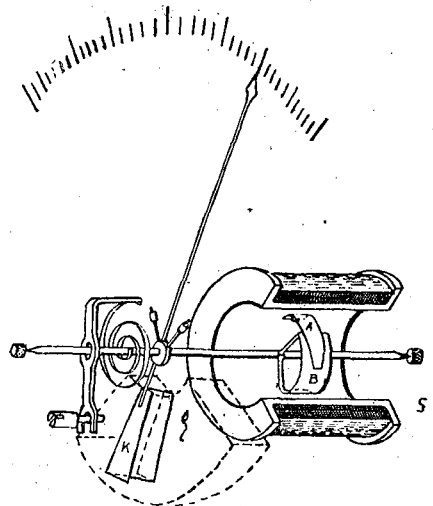


Рис. 3.

листа железа намагнитятся, и их одноименные полюса будут отталкиваться, вследствие чего подвижная система будет отклоняться. Этот принцип использован в электромагнитном приборе с круглой катушкой (рис. 3). В том и другом типе электромагнитного при-

бора направление отклоняющей силы не зависит от направления тока, следовательно электромагнитные приборы пригодны для постоянного и для переменного тока. Благодаря отсутствию подвода тока в подвижную систему и простоте устройства, электромагнитные приборы исключительно выносливы к перегрузкам током; согласно Союзного стандарта (ОСТ 5236) электромагнитные амперметры должны выдерживать в течение 5 секунд 10-кратную перегрузку током без каких бы то ни было повреждений. По этой причине большинство технических амперметров на распределительных щитах электрических станций и промышленных предприятий принадлежит к электромагнитной системе. Однако, большой точностью и чувствительностью эти приборы не обладают и для точных измерений не применяются.

Два проводника, по которым проходит ток, притягиваются при одинаковом направлении тока и отталкиваются при различном направлении тока;

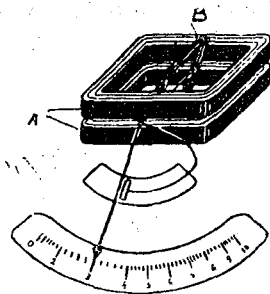


Рис. 4.

на этом принципе основано устройство электродинамических приборов; в них имеются две катушки (рис. 4), одна неподвижная (А), а другая подвижная (В). Когда по катушкам проходит ток, то подвижная катушка стремится стать так, чтобы направление ее магнитного поля совпало с направлением поля неподвижной катушки. Ток в подвижную катушку подводится через две спиральные пружинки, они же создают противодействующий вращению момент.

Направление действия крутящей силы не изменяется, если ток изменяет направление одновременно в обеих катушках, следовательно — прибор

пригоден для постоянного и переменного токов. Магнитное поле в электродинамическом приборе создается в воздухе, вследствие чего оно относительно очень слабо, а благодаря этому прибор очень чувствителен к внешним магнитным влияниям; кроме того, прибор плохо переносит перегрузки и относительно дорог. По всем этим причинам электродинамические приборы используются главным образом в качестве контрольных и лабораторных приборов переменного тока; в этом случае они поверяются при постоянном токе путем сличения с магнитоэлектрическими приборами или по способу компенсации (см. ниже).

Металлическая (в частности в приборах — платиноридиевая) проволока удлиняется при прохождении тока вследствие нагревания, это удлинение с помощью системы передач и блока может быть использовано для измерения тока (см. XII, 463). Основанный на этом принципе тепловой прибор пригоден для измерения постоянного и переменного тока, включая сюда и переменный ток высокой частоты. Тепловой прибор очень плохо переносит перегрузки и не особенно точен, благодаря чему применение этих приборов в настоящее время ограничивается радиотехническими установками и специальными лабораторными измерениями.

Переменный ток, проходя через катушку, создает переменное магнитное поле с постоянным направлением оси поля в пространстве (пульсирующее магнитное поле). Если две катушки расположены в пространстве под некоторым углом, то два несопадающих по фазе переменных тока, проходя по этим катушкам, создадут в пространстве между последними результирующее магнитное поле, направление которого будет непрерывно меняться; это будет вращающееся магнитное поле. Алюминиевый цилиндр (Т) или диск, снабженный осью, во вращающемся магнитном поле будет стремиться вращаться вслед за полем благодаря токам Фуко, наводимым в алюминии при пересечении его магнитными линиями вращающегося поля. На этом принципе основаны индукционные приборы переменного тока.

(рис. 5). Эти приборы хорошо выносят перегрузки, но неточны, — на их показания сильно влияют изменения температуры и колебания частоты переменного тока; поэтому индукционные при-

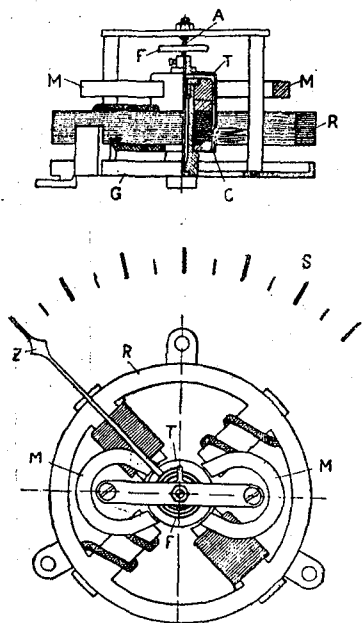


Рис. 5.

боры употребляются главным образом в качестве ваттметров и счетчиков переменного тока для промышленных измерений.

Металлические пластинки, соединенные с разноименными полюсами источника тока, заряжаются разноименными

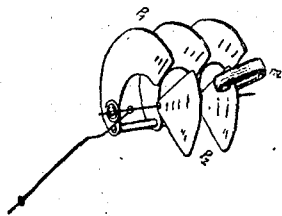


Рис. 6.

зарядами, благодаря чему начинают взаимно притягиваться. Это явление использовано в электростатических вольтметрах (рис. 6), в которых неподвижные пластинки соединяются с од-

ним полюсом источника тока, а подвижные пластинки, соединенные со стрелкой, с другим полюсом. Противодействующий момент создается пружиной. При одновременном изменении знака заряда обеих пластин направление действия силы не изменяется, следовательно электростатический вольтметр пригоден для измерения постоянного и переменного напряжений. Крутящий момент в этом приборе пропорционален квадрату напряжения; поэтому электростатический вольтметр для низких напряжений, в целях усиления крутящего момента, вместо одной пары пластин снабжается рядом подвижных пластин, входящих между рядом неподвижных пластин (многокамерный вольтметр). Тем не менее, крутящий момент (в приборах на напряжениях ниже 1.000 вольт) относительно слаб, а подвижная система относительно очень тяжела, что в общем делает прибор хрупким и мало пригодным для практических условий.

Основное преимущество этого прибора заключается в том, что он относительно просто может быть построен для приключения непосредственно к высокому напряжению; второе достоинство электростатического вольтметра — это то, что он практически совершенно не потребляет энергии, благодаря чему он применяется для таких измерений, при которых вольтметр не должен потреблять энергию, чтобы не нарушать ход явления.

В электроизмерительном приборе, кроме крутящего момента, необходим противодействующий момент, без чего стрелка прибора не могла бы принять определенное положение на шкале, а под действием даже небольшого крутящего момента отклонялась бы за конец шкалы прибора. В большинстве электроизмерительных приборов противодействующий момент создается пружиной из фосфористой бронзы, реже для противодействующего момента используется сила тяжести и в очень немногих приборах (в некоторых типах фазометров и омметров) — электромагнитная сила.

Чтобы стрелка приняла достаточно быстро определенное положение на шкале, а не колебалась длительно око-

ло положения равновесия, подвижная часть прибора снабжается успокоителем — приспособлением, тормозящим колебания подвижной части прибора. В настоящее время применяются воздушные и магнитные успокоители. Воздушный успокоитель состоит из поршня *K* (рис. 2 и 4) или крыла *K* (рис. 3), связанного механически с подвижной системой и движущегося в закрытом цилиндре или камере; трение о воздух этого поршня поглощает силу инерции подвижной части электроизмерительного прибора и тем успокаивает ее колебания. Магнитный успокоитель состоит из связанного с осью подвижной части алюминиевого сектора, вращающегося между полюсами постоянного магнита (рис. 6); при движении между полюсами постоянного магнита в алюминии наводятся токи Фуко; последние, взаимодействуя с полем постоянного магнита, тормозят колебания подвижной части прибора.

Подвижная часть прибора опирается двумя стальными концами осей на два подпятника; в последних опорой конца оси служит маленький, выточенный в виде миниатюрной чаши, драгоценный камень — в большинстве случаев агат. При неисправном состоянии концов осей или камней может получиться заедание в подпятниках, что можно обнаружить путем легкого постукивания по крышке прибора. Для устранения влияния силы тяжести на показания прибора подвижная система последнего должна быть уравновешана по отношению к своим точкам опоры; это осуществляется при помощи специальных грузиков, укрепляемых на подвижной части. Стрелка правильно уравновешанного прибора без тока не должна значительно смещаться с нуля при любых положениях скалы.

В зависимости от назначения электроизмерительные приборы разделяются на технические и точные (так называемые „прецизионные“), последние в свою очередь разделяются на контрольные и лабораторные. От технических приборов требуются прочность, дешевизна и простота применения, их точность имеет второстепенное значение. Характерным внешним признаком

точных приборов является зеркальная скала, — зеркало, помещенное под стрелкой рядом со скалой и служащее для устранения зависимости отсчета показания прибора от положения глаза наблюдателя (погрешности параллакса).

Выбор системы электроизмерительного прибора зависит от специальных условий данного измерения; некоторое сравнение систем приборов в отношении точности и стоимости дает составленная по Кейвату таблица:

№№	Род прибора и система	Точность в %	Цена в германских марках
1	Электромагнитные А, V	1	ок. 40
2	Магнитоэлектрические А, V	1	„ 50
3	Резованские I	0,5	„ 100
4	Тепловые А, V	1,5	„ 100
5	Индукционные А, V	2,5	„ 125
6	Электродинамические А	1	„ 150
7	Индукционные W	2	„ 160
8	Магнитоэлектрические точные А, V	0,25	„ 180
9	Электростатические V	2,5	„ 200
10	Электродинамические W	1	„ 225
11	Электромагнитный вольтметр с измерительным трансформатором на 6 кВ	1,5	„ 250
12	Стрелочные частотомеры	1	„ 275
13	Электродинамические точные W	0,25	„ 275
14	Электродинамические сов ф	1	„ 325

В зависимости от целей измерения электроизмерительной системе придается та или иная конструктивная форма, отображающая требования данного измерения и особенность включения данного измерительного прибора. Простейшую конструктивную форму имеют амперметры и вольтметры.

Амперметр (см. XII, 460 сл.) служит для измерения силы тока, он включается в цепь измерения последовательно, и через него проходит весь измеряемый ток (рис. 8) или определенная часть этого тока. Изготавливаются амперметры всех выше перечисленных систем, кроме, конечно, электростатической. В ряде случаев технические затруднительно изготовить амперметр, рассчитанный на всю силу тока измерения, в таких случаях применяется шунтирование амперметра. Параллельно амперметру в цепь

включается известное малое сопротивление — шунт (рис. 7; ср. XII, 456); по закону разветвления токов  $I_A : I_{ш} = R_{ш} : R_A$  и измеряемый ток  $I = I_A + I_{ш}$ ; в таких условиях сила тока в амперметре  $I_A$  составляет только небольшую

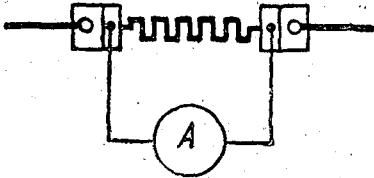


Рис. 7.

определенную долю измеряемого тока, на основании измерения которой определяется вся сила тока  $I$ . У технических амперметров, предназначенных для работы с определенным шунтом, деления шкалы размечаются для всей силы тока  $I$  вместо фактически измеряемой  $I_A$  — силы тока в амперметре; таким образом устраняется необходимость для определения  $I$  умножать показания прибора на какие-либо коэффициенты. Для точной работы шунтированного амперметра необходимо постоянство отношения сопротивления амперметра  $R_A$  к сопротивлению шунта  $R_{ш}$ ; для того, чтобы достичь постоянства сопротивления шунта, последний изготавливается из специальных сплавов, сопротивление которых почти не изменяется с изменением температуры. Лучшим и наиболее распространенным из этих сплавов является манганин (сплав из 84% меди, 12% марганца, 4% никкеля). Шунтами снабжаются только амперметры магнитоэлектрической и тепловой систем.

Вольтметр служит для измерения напряжения, он подключается между теми точками электрической цепи, напряжение между которыми должно быть измерено, т.е. параллельно объекту измерения (рис. 8). Измерительная система вольтметра всегда соединяется последовательно с добавочным сопротивлением, помещаемым как внутри кожуха прибора, так и снаружи. Добавочное сопротивление не должно изменяться с изменением температуры, поэтому оно изготов-

ляется из манганина или константана (сплав 57% меди, 43% никкеля).

Ваттметр служит для измерения мощности; он имеет две измерительные цепи, из которых „токовая“ цепь включается последовательно, как амперметр, а цепь напряжения, содержащая добавочное сопротивление, подключается параллельно, как вольтметр (рис. 8). Так как в ваттметре крутящий

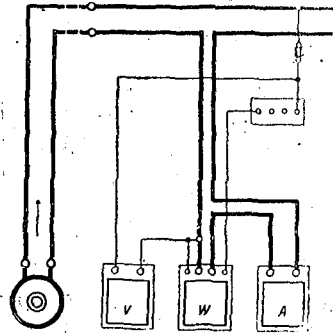


Рис. 8.

момент, действующий на подвижную часть прибора, должен быть пропорционален произведению напряжения и силы тока (их мгновенных значений при переменном токе), то для ваттметра могут быть применены только те системы электроизмерительных приборов, в которых крутящий момент создается в результате совместного действия двух токов и в которых он пропорционален произведению этих токов; следовательно, для целей измерения мощности могут быть использованы только электродинамическая и индукционная системы приборов. В электродинамических ваттметрах неподвижная катушка служит токовой цепью прибора, т.е. включается последовательно как амперметр, а подвижная катушка, соединенная последовательно с добавочным сопротивлением, служит цепью напряжения прибора и подключается параллельно, как вольтметр. В индукционном ваттметре одна пара катушек служит токовой цепью прибора, а другая пара — цепью напряжения, при чем во второй паре катушек с помощью специальной схемы осуществлен 90°-ный сдвиг по фазе тока в катушках по отношению к на-

пряжению на зажимах прибора; это нужно для того, чтобы крутящий момент в ваттметре, создаваемый вращающимся полем, был пропорционален коэффициенту мощности ( $\cos \varphi$ ).

Для измерения мощности трехфазного тока при равномерной нагрузке фаз можно пользоваться одним ваттметром, цепь напряжения которого приключается через искусственную нулевую точку а токовая цепь вклю-

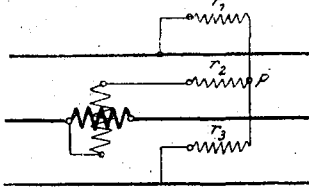


Рис. 9.

чается в один из линейных проводов (рис. 9). Для измерения мощности трехфазного тока при неравномерной нагрузке фаз в установках без нулевого провода применяется способ двух ваттметров (способ Арона), схема соединений при пользовании которым показана на рис. 10, а в установках с нуле-

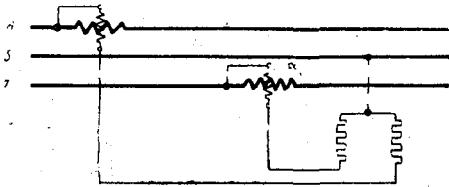


Рис. 10.

вым проводом применяется способ трех ваттметров (рис. 11). В обоих этих слу-

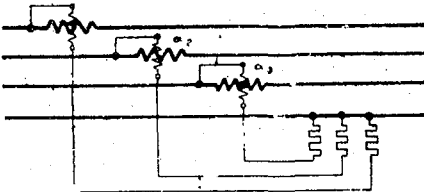


Рис. 11.

чаях для технических измерений ваттметры объединяются в один прибор, в котором две или три измерительные

системы действуют на общую ось и стрелку; такой ваттметр трехфазного тока показывает сразу всю мощность трехфазной установки. Он имеет число зажимов соответственно числу составляющих его ваттметров.

Электрические счетчики служат для измерения электрической работы, которая равна произведению мощности на время. Счетчики включаются в цепь так же, как ваттметры.

Электродинамический счетчик служит для измерения энергии (работы) постоянного тока, он представляет собой по существу миниатюрный двигатель постоянного тока. Рабочий ток проходит в счетчике через две неподвижные катушки (рис. 12) и создает основное магнитное поле счетчика. Между неподвижными катушками вращается

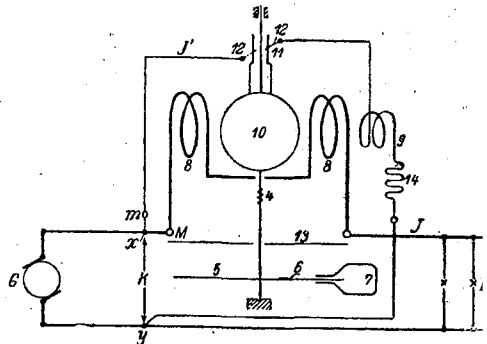


Рис. 12.

якорь счетчика, состоящий не менее чем из трех катушек тонкой проволоки, соединенных в обмотку якоря. Ток в якорь подводится через серебряные щетки и коллектор. Якорь соединен последовательно с большим добавочным сопротивлением и вспомогательной катушкой (компенсатором трения). Для поглощения механической работы якоря—для торможения—на якоре счетчика помещен алюминиевый диск, вращающийся между полюсами постоянного магнита. Взаимодействие тока в якоре, пропорционального напряжению сети, и рабочего тока в неподвижных катушках создает крутящий момент якоря, пропорциональный мощности, потребляемой в сети; вращение диска между



полюсами постоянного магнита вызывает токи Фуко в диске, последние же, взаимодействуя с полем постоянного магнита, создают тормозящий момент, пропорциональный окружной скорости диска, а следовательно, — и числу оборотов якоря в единицу времени. При установившейся скорости вращения якоря крутящий и тормозящий моменты равны, следовательно — число оборотов якоря в единицу времени пропорционально мощности, потребляемой в цепи, а все число оборотов за данный промежуток времени пропорционально электрической работе, потребленной в контролируемой нагрузке за этот промежуток времени. Обороты якоря, через посредство червячной передачи и системы шестерен, приводят в действие счетный механизм, который показывает произведенную работу непосредственно в киловаттчасах (иногда в гектоваттчасах). Вспомогательная катушка, взаимодействуя с якорем, создает дополнительный крутящий момент, который уравнивает момент сил трения якоря в подпятниках и в счетном механизме. При неточности работы счетчика его можно регулировать посредством перемещения постоянного магнита.

Индукционный счетчик служит для измерения энергии переменного тока. Основными частями счетчика являются два электромагнита: один из них имеет П-образную форму, он снабжен обмоткой из толстой проволоки, по которой проходит рабочий ток; второй электромагнит имеет е-образную форму, на нем помещена обмотка напряжения из тонкой проволоки. Вращающееся магнитное поле, создаваемое совместным действием магнитных полей обоих электромагнитов счетчика, вызывает в алюминиевом диске токи Фуко и создает действующий на диск крутящий момент, пропорциональный мощности переменного тока. Тормозящий момент создается, так же как в электродинамическом счетчике, действием на тот же диск постоянного магнита. Вращение якоря через червячную передачу приводит в действие счетный механизм. Индукционный счетчик регулируется путем смещения постоянного магнита.

Счетчики трехфазного тока представляют собой соединение в общем кожухе, с общей осью и общим счетным механизмом двух или трех счетчиков; включаются они так же, как ваттметры трехфазного тока.

Частотомеры служат для измерения частоты переменного тока, т. е. числа периодов переменного тока в секунду. Наиболее употребителен резонансный частотомер (рис. 13). Этот прибор

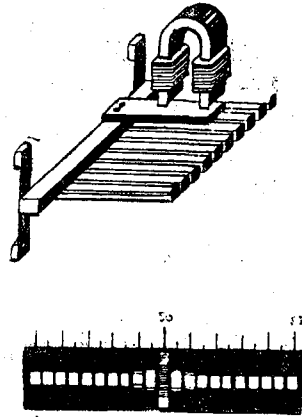


Рис. 13.

заключает в себе электромагнит, через катушку которого проходит измеряемый переменный ток; создаваемое последним переменное магнитное поле то сильнее, то слабее притягивает к себе укрепленную на упругих стальных полосках железную пластину, в результате чего последняя начинает дрожать соответственно частоте переменного тока. На этой полосе помещен ряд стальных язычков; благодаря дрожанию своего железного основания они также начинают дрожать, но большой размах получают колебания только того язычка, собственная частота которого равна частоте переменного тока. Чтобы сделать эти колебания более заметными, концы язычков отогнуты и окрашены белой краской. Частотомер приключается параллельно, т. е. так же, как вольтметр.

Омметры употребляются, гл. обр., для измерения сопротивления изоляции. Так как значения этого сопротивления обычно очень велики, то омметры гра-

дуируются в миллионах ом (мегахмах). Внешний вид одного из омметров и его внутренняя схема соединений показаны на рис. 14 а и в. Основными частями омметра являются: магнитоэлектрическая

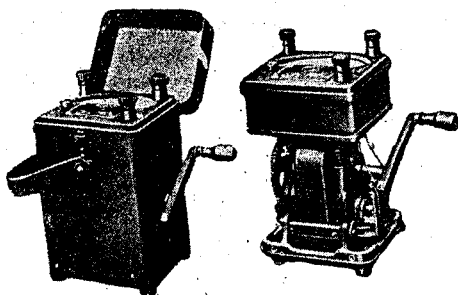


Рис. 14а.

машина — индуктор ( $M$ ), приводимая во вращение от руки, затем соединенный последовательно с ней измерительный прибор, проградуированный в мегахмах ( $M\Omega$ ), добавочные сопротивления и измеряемое сопротивление  $R_x$ . При измерении сопротивления изоляции один за-

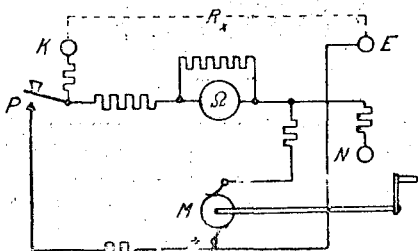


Рис. 14 в.

жим омметра соединяется с испытуемым проводом (зажим  $K$  на рис. 14), а другой с землей (зажим  $E$ ). Сопротивление изоляции — величина непостоянная, достаточно знать ее приближенное значение, поэтому от омметров большой точности не требуется.

В установках высокого напряжения измерения производятся при посредстве измерительных трансформаторов. Последние необходимы, гл. обр., для того, чтобы отделить электрический измерительный прибор от сети высокого напряжения. Амперметр, например, можно было бы включить последовательно в провод линии высокого напряжения, но не только прикосновение, а

даже приближение к включенному таким способом амперметру было бы опасно для жизни обслуживающего персонала. В измерительных трансформаторах между первичной обмоткой, находящейся под высоким напряжением, и вторичной, соединенной с измерительным прибором, существует только магнитная связь, так же как в силовом трансформаторе. Так обр., измерительный прибор оказывается совершенно отделенным от высокого напряжения; кроме того, для устранения возможности появления на вторичной обмотке трансформатора высокого напряжения по отношению к земле, вторичная цепь измерительного трансформатора в одной точке соединяется с землей — „заземляется“. В зависимости от назначения измерительные трансформаторы разделяются на трансформаторы напряжения, служащие для измерения напряжения, и трансформаторы тока, служащие для измерения силы тока. Трансформатор напряжения (рис. 15) подключается параллельно к точкам, напряжение между которыми нужно измерять; ко вторичной обмотке его параллельно между собой приключаются измерительные приборы, — например вольтметр и цепь напряжения счетчика. Первичная обмотка имеет большое, а вторичная малое число витков.

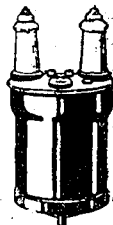


Рис. 15.

Напряжения в трансформаторе относятся как числа витков соответствующих обмоток. Трансформатор напряжения рассчитывается так, чтобы при номинальном первичном напряжении он давал вторичное напряжение 100 вольт. Так обр., благодаря трансформатору напряжения, измерение высокого напряжения сводится к измерению низкого напряжения и умножению результатов на коэффициент трансформации. Условия работы трансформатора напряжения соответствуют холостому ходу силового трансформатора.

Трансформатор тока (рис. 16) включается в цепь последовательно, обычно он имеет малое число витков в первичной обмотке (иногда только один виток)

и значительно большее во вторичной; токи в трансформаторе относятся обратно пропорционально числу витков; так, обр., в цепи вторичной обмотки трансформатора тока, отделенной от высокого напряжения, измерение ведется при относительно малых силах тока

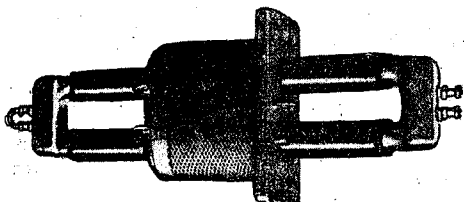


Рис. 16.

(нормально 5 ампер при полной нагрузке трансформатора с первичной стороны). Помимо точности коэффициента трансформации от трансформатора тока требуется прочность — устойчивость в отношении коротких замыканий. Измерительные приборы включаются во вторичную цепь трансформатора тока последовательно. Цепь напряжения счетчика или ваттметра приключается к вторичной обмотке трансформатора напряжения, а токовая цепь счетчика или ваттметра замыкается на вторичную обмотку трансформатора тока (рис. 17); в этом случае показан

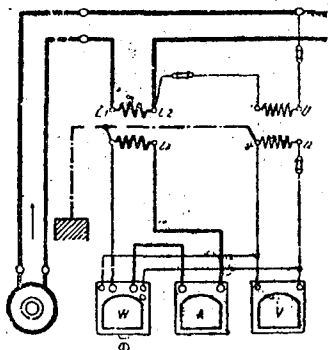


Рис. 17.

ная счетчика или ваттметра нужно умножать на коэффициенты трансформации обоих измерительных трансформаторов.

Точность измерения, даваемая электроизмерительными приборами, в ряде

случаев оказывается недостаточной; далее — сами электроизмерительные приборы должны быть проверены в условиях, гарантирующих высокую точность измерения; наконец, ряд электрических величин не может быть измерен непосредственно по показаниям электроизмерительных приборов. В подобных случаях приходится обращаться к сравнению измеряемой величины или показаний поверяемого прибора с эталоном измеряемой величины, т.е. с вещественным образцом единицы измерения. Это сравнение производится при помощи тех или иных измерительных устройств.

В настоящее время основными эталонами для электрических измерений являются эталоны сопротивления и эталоны электродвижущей силы. „Первичным“ эталоном сопротивления является ртутный эталон электрического сопротивления. Он представляет собой наполненную чистой ртутью, строго калиброванную (т.е. имеющую строго равномерное сечение) стеклянную трубку, концы которой вставлены в два шарообразных стеклянных сосуда, также наполненных чистой ртутью; в эти сосуды впаяны платиновые проволочки, служащие для включений эталона в измерительную цепь. Ртутный эталон применяется только для сравнения с ним вторичных эталонов. Такие сравнения производит в СССР Всесоюзный институт метрологии и стандартизации в Ленинграде (бывшая Главная палата мер и весов). Вторичные эталоны, служащие для точных лабораторных измерений, изготавливаются в виде катушек из манганина; такие катушки известны под названием нормальных сопротивлений (рис. 18). Эталон сопротивления должен иметь четыре зажима для устранения влияния переходных сопротивлений контактов по отношению к цепи измерения; из них два зажима служат для включения эталона

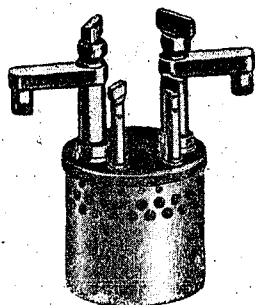


Рис. 18.

в цепь тока, а два другие для измерения падения напряжения на эталоне. Особенно важно наличие четырех зажимов для эталонов малого сопротивления.

Для измерений, допускающих меньшую точность, вторичными эталонами служат магазины сопротивлений штепсельного (рис. 19) и рычажного типа



Рис. 19.

(рис. 20). Эти магазины представляют собой ряд катушек сопротивления в общем ящике; катушки вводятся в цепь при помощи системы штепселей или рычажных контактов. Для устранения мешающего влияния самоиндукции, катушки сопротивлений наматываются бифилярно, однако катушка, намотан-

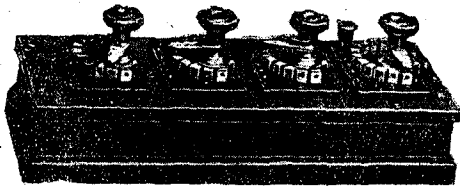


Рис. 20.

ная бифилярно, обладает значительной емкостью; поэтому сопротивления, служащие для точных измерений переменного тока, наматываются более сложным образом в целях устранения как самоиндукции, так и емкости (обмотка по Шапейрону или обмотка по Вагнеру и Вертгеймеру).

В качестве эталонов электродвижущей силы применяются нормальные

элементы Вестона. При тщательном изготовлении электродвижущие силы отдельных нормальных элементов Вестона отличаются друг от друга не больше чем на 0,01 милливольт. С изменением температуры электродвижущая сила нормального элемента несколько изменяется, но эти изменения с большой степенью точности могут быть учтены при помощи формулы:

$$E_i = 1,0183 - 4,06 \cdot 10^{-5} \cdot (t - 20^\circ) - 0,95 \cdot 10^{-6} \cdot (t - 20^\circ)^2 + 1 \cdot 10^{-8} \cdot (t - 20^\circ)^3.$$

При  $20^\circ$  электродвижущая сила нормального элемента Вестона = 1,0183 вольта.

Электроизмерительные устройства служат, гл. обр., для точных измерений электрических величин путем сравнения последних с соответствующими эталонами. Особенно точными являются электроизмерительные устройства, работающие по так называемому нулевому методу. Сущность последнего заключается в том, что измеряемая величина определяется на основании отсчета значений известных регулируемых величин при равновесии измерительного устройства, что соответствует отсутствию тока в определенной ветви устройства.

Характерным измерительным устройством является мостик Уитстона, употребляемый для сравнения сопротивлений. Его принципиальная схема дана на рис. 21; как видим, мостик состав-

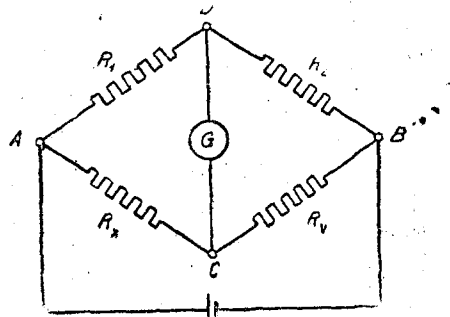


Рис. 21.

ляется из четырех сопротивлений:  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_x$  и  $R_0$ , называемых часто плечами мостика, из чувствительного гальванометра  $G$  и источника тока. Равновесие мостика Уитстона наступает при

отношения сопротивлений:  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_v}$ .

Для целей измерения мостик составляется из трех известных регулируемых сопротивлений и одного неизвестного, измеряемого сопротивления. Техническая форма мостика, составленного согласно рис. 21, это декадный мостик Уитстона (рис. 22), в котором

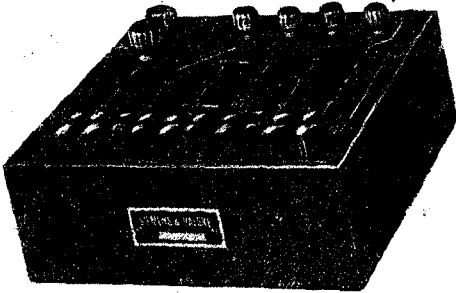


Рис. 22.

регулируемые сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  могут принимать значения: 10, 100, 1.000, 10.000 — т.е. значения целых степеней 10. На место  $R_3$  включается измеряемое сопротивление  $R_x$ , а на место  $R_4$  — известное сопротивление  $R$ , которое можно регулировать в относительно широких пределах (обычно это штепсельный или рычажный магазин сопротивлений). При уравновешенном мостике  $R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R$ , и для определения  $R_x$

достаточно умножить или разделить  $R$  на единицу с нулями. Для ряда измерений, требующих меньшую точность, применяется более простой и дешевый проволочный мостик Уитстона; в нем сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  заменены одной тонкой калиброванной проволокой из манганина, называемой реохордом.

Для измерения сопротивлений проводников второго рода, т.е. проводников, разлагаемых действием постоянного тока, применяется мостик Кольрауша, — это мостик Уитстона, питаемый переменным током звуковой частоты с телефоном на месте гальванометра. Мостик Уитстона, питаемый переменным током, употребляется также для измерения самоиндукции, взаимной индукции и емкости. Мостик Уитстона для технической частоты (50 пер/сек) работает

с вибрационным гальванометром вместо телефона. Для измерения сопротивлений меньше 0,5 ома применяется двойной мостик Томсона.

Точные электроизмерительные приборы поверяются посредством сравнения их показаний со значением электродвижущей силы нормального элемента. Это сравнение производится при помощи измерительного устройства, носящего название компенсатора, или потенциометра. Компенсационный метод основан на сравнении электродвижущей силы, или напряжения, с падением напряжения в известном сопротивлении, по которому проходит ток. Две электрические цепи при этом измерении соединяются так, чтобы падение напряжения на сопротивлении, входящем в одну цепь тока, уравновешивало электродвижущую силу, действующую во второй цепи, благодаря чему в последней ток становится равным нулю. Одна из принципиальных схем метода компенсации показана на рис. 23. При

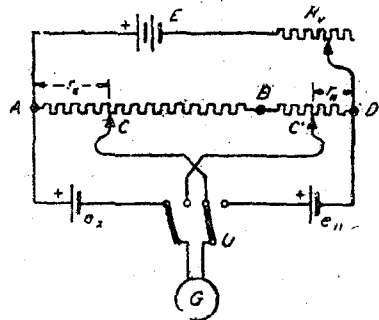


Рис. 23.

правом положении переключателя  $U$ , при отсутствии тока в гальванометре, электродвижущая сила нормального элемента уравновешивается падением напряжения в сопротивлении  $r_n$ ,  $e_n = i \cdot r_n$ , а при левом положении переключателя, при отсутствии тока в гальванометре, неизвестная электродвижущая сила  $e_x = i \cdot r_x$ ; на основании этого определяется  $e_x = e_n \cdot \frac{r_x}{r_n}$ . Для измерения силы тока на место  $e_x$  включается нормальное сопротивление  $R_n$ , через которое пропускается получаемый от отдельного источника измеряемый

ток  $I_x$ ; при отсутствии тока в гальванометре  $I_x = \frac{e_n}{R_n} \cdot \frac{r_x}{r_n}$ .

Для точных измерений переменного тока применяются электродинамические приборы, так как они пригодны для постоянного и для переменного тока. Они поверяются при постоянном токе с помощью компенсатора, а затем данные этой поверки используются для измерения переменного тока. Для специальных измерений векторных величин переменного тока применяются компенсаторы переменного тока.

Литература: Линкер, "Электротехнические измерения" (1927); Базилевич, "Электротехнические измерения и приборы" (1927); Шателен и Пономарев, "Лабораторные измерения по электротехнике" (1932); Черданцев, "Электротехнические измерения" (1931); Грун, "Электротехнические измерительные приборы" (1932); его же, "Лабораторные измерения по электротехнике" (1933).

А. Касаткин.

III. Электротехнические материалы. Разнообразие применяемых в совре-

менной Э. материалов чрезвычайно велико. В основном их можно классифицировать следующим образом: 1) проводники электрического тока, 2) проводники магнитного потока, 3) изолирующие материалы, 4) строительные и крепежные материалы, не служащие специально ни для одной из указанных выше целей. Все Э. м. должны обладать высоким качеством и стандартностью, т. е. главным образом этими свойствами обеспечиваются огромные технические возможности современной Э. Так, напр., развитие высоковольтной техники стало возможным лишь благодаря высоким качествам и однородности изолирующих материалов.

Проводники электрического тока. Основными материалами являются медь и алюминий. Физические и электротехнические свойства их показаны в следующей таблице:

	Cu			Al	
	Электротехническая	Твердо-тянутая	Мягко-тянутая		
Удельн. вес . . . . .	8,88—8,75	8,98—8,949	8,98—8,94	2,68	г/см <sup>3</sup>
Удельн. сопротив. . . . .	0,01724	0,01784	0,0175	0,03	Ω мм <sup>2</sup> /м
Темпер. коэфф. . . . .	0,0428	—	—	0,039	
Темпер. плавл. . . . .	1057	1057	1057	657	°C
Сопротив. разрыву . . . . .	—	43—46	22—23	2—25	кг/см <sup>2</sup>
Удли. при разрыве . . . . .	—	1	до 40	3	%
Теплопроводн. . . . .	3,48—3,92	8,48—3,92	3,48—3,92	1,43	вт/°C см

Достоинства меди—большая проводимость, возможность применения пайки. Достоинства алюминия—легкость и дешевизна. В качестве проводников применяются еще: латунь (сплав меди с цинком) и различные бронзы (сплавы с оловом и другими металлами). Чаще всего встречаются: алюминиевая бронза (5,5—11,5% Al), применяемая для изготовления физических инструментов;

фосфористая бронза (0,5—1% P)—для изготовления телефонной проволоки; кремнистая бронза (1,15% Sn и 0,05 Si)—для трамвайных контактных проводов.

Для изготовления реостатов, сопротивлений и нагревательных приборов применяют сплавы большого сопротивления, из которых главнейшими являются:

Название	Состав	Уд. вес г/см <sup>3</sup>	Уд. сопр. Ω мм <sup>2</sup> /м	Темпер. коэфф.
Нейзильбер . . . . .	Cu, Ni, Zn	8,77	0,3	0,002—0,0007
Никелин . . . . .	Cu, Ni, Zn	—	0,5	0,00028
Константан . . . . .	Cu, Ni, Mn	—	0,5	0,00003
Крупний . . . . .	Ni, Fe, C	8,1	0,85	0,0007
Манганин . . . . .	Cu, Mn, Ni	8,4	0,4	0,000008
Ферроманганин . . . . .	Cu, Mn, Fe, Si	—	0,502	0,0016
Монель . . . . .	Ni, Cu, Fe, Mn, Si	—	0,568	0,0008
Реостан . . . . .	Cu, Fe, Zn, Mn	8,5	1,0	0,0028
Нихром . . . . .	Ni, Cr	—	1,4	0,00022

В последнее время широко распространяется для изготовления телефонных проводов железа, в виде биметаллического провода. Эти провода состоят из железной жилы, покрытой снаружи медью, латунью или другим металлом. Покрытие раньше производилось электролитическим путем, теперь оба металла сваривают. Преимущество — половинная стоимость по сравнению с бронзой.

Для изготовления нитей накала в электролампах применяют тугоплавкие металлы: вольфрам, осмий, рений (температура плавления 3200—3400°C). Для крючков, поддерживающих нить накала, а также для внутренних частей электронных ламп обычно применяют молибден (т-ра плавления 2450°C), не теряющий эластичности при нагреве.

Предохранители (плавкие) изготавливаются из серебра (уд. сопротивление 0,0156  $\Omega \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ , температурный коэфф. 0,0034) и свинца (уд. сопрог. 0,22  $\Omega \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ , температурный коэфф. 0,0041). Из свинца же, как металла, не подверженного действию кислот, изготавливают части и соединения для аккумуляторов. Платина, благодаря своей твердости и неокисляемости (особенно в сплаве с иридием) идет для изготовления контактов в электрических приборах. Кроме того, из нее, благодаря ее пластичности, изготавливают нити для некоторых измерительных приборов (толщиной до 0,001 мм).

Кроме металлов, в качестве проводников электрического тока применяют уголь как материал для щеток к машинам, для микрофонов, для дуговых фонарей. В зависимости от назначения изделия состав угольной массы варьи-

руется в широких пределах. Исходными материалами являются: ретортный уголь (остающийся при получении светильного газа), измельченный каменный уголь, кокс, сажа, графит. В качестве цементирующих веществ применяются каменноугольная смола, патока, фурфурол, фунузол, жидкое стекло. Щетки для машин изготавливаются различной твердости (от 77 до 20 по склероскопу Шора), при чем более твердые сорта допускают большую разность потенциалов, но скорее изнашивают коллектор (подробности см. Общесоюзный стандарт, ГОСТ 1594). Части для микрофонов изготавливаются из очень плотного угля. Угли для дуговых ламп, с целью большей устойчивости дуги, снабжаются „фитилями“, т.е. внутри угля устраивается канал (1—3 мм), заполняемый смесью угольной пыли, жидкого стекла, фосфористокислого калия или магния. При изготовлении „пламенных“ углей, для окраски пламени в состав вводятся различные вещества (напр. фтористый кальций, стронций или барий).

Проводники магнитного потока. Основным материалом является железо и его модификации и сплавы. При изготовлении постоянных магнитов весьма важно значение остаточного магнетизма, остаточной интенсивности намагничивания и коэрцитивной силы. Обычно мерой служит произведение двух последних величин, которое не должно быть меньше 64.000, при коэрцитивной силе в 80 и интенсивности 800. Чем меньше углерода, тем меньше коэрцитивная сила. По стандарту СССР различаются три марки магнитной стали:

Марка	Название	Сила поля	Остаточная индукция	Коэрцитивная сила	Максимальная магнитная энергия $B_r \cdot H_c$ эрг/см <sup>3</sup>
		$H$	$B_r$	$H_c$	
в гауссах					
Х	Хромистая сталь	500	8.000	60	10.000
В	Вольфрамовая сталь	500	10.500	55	11.000
К/И	Кобальтовая (до 10% Со)	1.000	9.000	100	15.000
К/С	" (10—20% Со)	1.000	9.000	160	25.000
К/В	" (выше 20% Со)	1.500	9.000	200	30.000

Применение железа в Э. особенно широко в области конструирования магнитопроводов. *Кремнистая сталь* по

своим магнитным свойствам занимает промежуточное положение между мягким железом и закаленной магнитной

-сталью. Уд. вес 6,94—7,88. Сопротивление разрыву 100 кг/мм<sup>2</sup>. Применяются следующие сорта:

Трансформаторное железо 0—0,10%С; 1—2%Si; 0,10%Mn  
 Динамное железо I 0—0,10%С; 0,7—1%Si; 0,3%Mn  
 Динамное железо II 0—0,10%С; 2—4%Si; 0—0,1%Mn

Кремнистую сталь называют еще легированным железом. *Марганцовая сталь* тем более магнитна, чем меньше содержание Mn (обычно 1—2%). Уд. вес 7,81—7,83. Сопротивление разрыву 65—75 кг/мм<sup>2</sup>. *Хромовая сталь* (ок. 2% Cr и 0,2% Mn) имеет уд. вес 7,59—7,77. Сопротивление разрыву 72—73 кг/мм<sup>2</sup>. *Вольфрамовая сталь* (2—3% W и 0,1—0,6% C) имеет сопротивление разрыву 53—90 кг/мм<sup>2</sup>. С увеличением содержания W магнитные свойства ухудшаются. *Алюминиевая сталь* (0,6—2,3% Al и ок. 0,2% C), уд. вес 7,55—7,78. На магнитные свойства алюминий в пределах 3—4% оказывает такое же влияние, как и кремний. *Никелевая сталь* (5—30% Ni) имеет уд. вес 7,7—7,8. Сопротивление разрыву 67—90 кг/мм<sup>2</sup>. Существует ряд более сложных сплавов (до 10 компонентов) под названиями: перминвар, пермелой, гиперник, сталь Крупна сталь СССР, ниросталь и др.

Для тех частей магнитопроводов, в которых имеет место переменное перемагничивание, применяют для уменьшения потерь листовую сталь (толщиной 0,35—0,5 мм). По стандарту СССР различают 3 сорта листовой электротехнической стали: сталь динамная (ст. Д), сталь динамная специальная (ст. С) и сталь трансформаторная (ст. Т). Подробности см. ОСТ 377.

**Изолирующие материалы.** В изолирующих материалах или диэлектриках помимо объемного сопротивления (как в проводниках), различают еще поверхностное. Кроме сопротивления, свойствами, характеризующими данный диэлектрик, являются: электрическая крепость, диэлектрическая постоянная, диэлектрические потери, механическая прочность, гигроскопичность, стойкость при высоких температурах, кислотоупорность и др. Наиболее часто встречающейся изолирующей средой является воздух. Электрическая крепость воздуха определяется формулой

$$V = 21 \frac{h(273 + 20)}{760(273 + t)} \text{ киловольт / см}$$

где  $h$  — давление ртутного столба в мм, а  $t$  — температура в °C. При расстоянии между электродами в  $d$  см пробивное на-

пряжение  $v_{пр} = V_0 \sqrt[3]{d^3}$ . Удельное сопротивление воздуха над поверхностью земли составляет  $5 \cdot 10^9$  МΩ см.

**Минеральные материалы.** Наибольшее распространение получили фарфор, стекло, слюда и ее препараты. Для изоляторов применяется фарфор, содержащий 50% каолина, 25% кварца и 25% полевого шпата. Прессование производится при давлении до 40 кг/см<sup>2</sup>. Поверхность изоляторов покрывается глазурью (смесь песка, мрамора, полевого шпата, мелкого каолина и магнезита). Пробивное напряжение составляет 85 кв/см. Диэлектрическая постоянная 4,4—5,4. Поверхностное сопротивление  $10^{10}$ — $10^{14}$  Ω/см<sup>2</sup>. Сопротивление на разрыв ~ 300 кг/см<sup>2</sup>.

Стекланные изоляторы изготавливают гл. обр. из бутылочн. стекла. Пробивное напряжение, в зависимости от сорта, 5,5—11,5 кв/мм. Диэлектрическая постоянная 6,96—9,9. Объемное сопротивление колеблется в зависимости от температуры (напр., при 0°C  $990 \cdot 10^6$  Ω/см<sup>3</sup>, а при 60°C  $784 \cdot 10^6$  Ω/см<sup>3</sup>).

Слюда встречается во многих модификациях, различающихся по своему химическому составу. В Э. применяются гл. обр. мусковит и флогопит. Эл. прочность слюды колеблется в пределе от 14 до 42 кв/мм. Диэлектрическая постоянная 2,5—6,7. В виду дороговизны слюды в больших кусках, обычно применяются ее препараты: миканит (кусочки слюды, склеенные лаком), микафолио (бумажная основа, на которую наклеен один слой слюды и покрыт лаком), микалекс (сплав слюдяного порошка со стеклом), амберит (подобный миканиту), меготальк (кусочки слюды, склеенные лаком и спрессованные в изделия), миканитовое полотно, миканитовая бумага и т. д. Область применения: изолирующие прокладки для коллекторов, трубки для изоляции впадин электромашин, прокладки между проводниками, втулки и т. д.

Мрамор (CaCO<sub>3</sub>), шифер, серпентин применяются для изготовления распределительных щитов, крышек для реостатов и т. д. Отличаются (особенно мрамором)



мор) большой гигроскопичностью и хрупкостью. Эл. прочность 1,5—3 кв/мм. Для несгораемой изоляции применяют асбест ( $3 \text{ Mg} \cdot \text{O} \cdot 2 \text{ Si O}_2 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$ ) и его препараты. Объемное сопротивление 0,16  $\text{MQ} \cdot \text{см}$ . Пробивное напряжение 0,8—2,8 кв/мм. Весьма гигроскопичен. Количество известных препаратов асбеста весьма велико (свыше 100 названий).

Каучук и его препараты. Уд. вес 0,914. Пробивное напряжение 24 кв/мм. Уд. сопротивление колеблется от  $3 \cdot 10^8$  до  $50 \cdot 10^8 \text{ MQ} \cdot \text{см}$ . К чистому каучуку для его удешевления добавляют различные вещества, как то: различные краски, воск, парафин, глет, магнезия и ряд сложных органических препаратов. Резиновая масса не отличается прочностью, и поэтому ее вулканизируют путем обработки серой. Твердый вулканизированный каучук носит название *эбонита* и применяется для изготовления изолирующих стержней, труб, листов, плит и фасонных изделий. Эл. прочность эбонита 24—34 кв/мм, поверхностное сопротивление  $5 \cdot 10^7$ — $9 \cdot 10^7 \text{ MQ}$ . Мягкий вулканизированный каучук применяется для изолирования проводов и изготовления изолирующих перчаток и ковров. Имеется большое количество препаратов, представляющих смеси каучука с различными веществами (озокеритом, окисью цинка, парафином, асбестом и т. д.). В настоящее время каучук изготавливается также синтетическим путем из нефти. К материалам, подобным каучуку и служащим в Э. для тех же целей изоляции проводов, относятся гуттаперча.

Смолы и воски. Естественные смолы (копалы, эламы, мастика, сандалак, канифоль, шеллак, даммара, терпентин) применяются для изготовления изолирующих лаков. Витуминозные смолы служат для изготовления компаундных масс для заливки кабельных муфт и т. д. Воски бывают: животные (пчелиный, жиропотовый, спермацет), растительные (карнаубский) и нефтяные (озокерит). Применяются для изоляции (боксовые массы для заливки телефонных коробок, конденсаторные заливки и т. д.), для пропитки дерева, бумаги, пряжи. Искусственные смолы получают в результате конденсации и полимеризации некоторых органических

веществ. Главнейшими являются: глип-таль, фенольноальдегид и кумарон.

Путем обработки фенольноальдегида получается 2 весьма важных вещества—бакелит и карболит, встречающихся под самыми разнообразными названиями. Для бакелита: эл. крепость 21—59 кв/мм, объемное сопротивление  $10^4$ — $10^6 \text{ MQ} \cdot \text{см}^3$ , поверхностное— $9 \cdot 10^3 \text{ MQ} \cdot \text{см}^2$ , диэлектрическая постоянная 4,5—7,0. Для карболита: эл. крепость 4,5—14,6 кв/мм, объемное сопротивление  $13 \cdot 10^3$ — $5,45 \cdot 10^7 \text{ MQ} \cdot \text{см}^3$ , поверхностное— $3,4 \cdot 10^5$ — $4,6 \cdot 10^7 \text{ MQ} \cdot \text{см}^2$ . Оба эти вещества хорошо обрабатываются и служат для изготовления труб, штанг изоляторов и др. фасонных частей.

Продукты целлюлозы. В лаковом производстве применяют нитро-целлюлозу, бензил-целлюлозу и этил-целлюлозу. Продуктом ацетил-целлюлозы является целлон, применяемый для рукояток, пластин, трубок и т. д. Эл. крепость его 28 кв/мм. Дерево в сухом состоянии обладает эл. крепостью 12 кв/мм, которая сильно падает при наличии влаги. Применяется в пропарафиненном или промасленном состоянии (для трансформаторов). Электрические и механические свойства весьма различны для разных пород.

Волокнистые материалы. Сюда относятся: пряжа, ткани, бумага, картон. Для изготовления пряжи служат волокна ряда растений, а также шелк и синтетическое волокно. Обычно для изоляции проводов применяется непропитанная или пропитанная (маслом, лаками, смолами) хлопчатобумажная пряжа, располагаемая в один или несколько слоев. Применяемые №№: 60, 100 и 160. Шелк применяется для изоляции очень тонких проводов. Ткани (хлопчатобумажные и льняные) применяются непропитанными и пропитанными. Число сортов и названий весьма велико. Наиболее известными являются: кембрик, миканитовое полотно, тесьма, прорезиненная лента. Бумага лучшего сорта изготавливается из льняного и хлопкового тряпья. Применяется для изоляции кабелей, обмоточных проводников, конденсаторов. Пропитывается парафином, воском и различными лаками. Прессованные волокнистые материалы (картон) встре-

чаются под названием пресшпана, толщиной от 0,10 до 5,0 мм. Эл. крепость 9—13 кв/мм, диэлектрическая постоянная—0,4. Пресшпан встречается под самыми разнообразными названиями (пилит, элэфантид, электроза и т. п.).

Путем перевода хлопка в коллоидальное состояние изготавливается фибра, имеющая меньшую гигроскопичность, чем картон, и допускающая механическую обработку.

**Жидкости.** Трансформаторное масло—продукт перегонки нефти, применяется для заливки трансформаторов, реостатов, выключателей и т. д. Уд. вес не более 0,92 при 15°C. Пробивное напряжение 12 кв/мм. Не должно содержать влаги (максимум 0,01%). Перед заливкой должно быть просушено длительным нагреванием. Диэлектрическая постоянная—2,2-2,5. Из других жидкостей, применяемых гл. обр. для изготовления лаков и для пропитки тканей, можно назвать: алкоголь, бензол, бензин, ацетон, льняное масло, олифу, смоляное масло, парафиновое масло, вазелиновое масло, древесное масло. Широкое применение в Э. имеют лаки, т. е. материалы, представляющие растворы каких-либо веществ в соответствующих растворителях и образующие при высыхании слой, непроницаемый для воды, воздуха и др. реагентов. Растворимыми материалами являются: копалы, канифоль, масла, жирные вещества, синтетические смолы, асфальт, битумы, целлюлоза, каучук, гуттаперча. Растворителями: эфир, спирт, бензин, масло, скипидар, вода, бензол, хлороформ, четыреххлористый углерод, ацетон, сероуглерод. Лаки спиртовые и эфирные наносятся кистью, а масляные и синтетические погружением. Эл. крепость лаков колеблется для масляных в пределах 6,7—36,7 кв/мм, для спиртовых 2,5—23 кв/мм.

**Строительные и крепежные материалы.** Здесь применяются гл. обр. различные стали (магнитные или немагнитные, в зависимости от назначения детали), бронзы и дерево (пропитанное и непропитанное). В прежнее время широко применялись чугунные отливки. Сейчас наблюдается большое стремление заменять их повсюду сварными деталями, обладающими мень-

шим весом, большей легкостью и надежностью изготовления и меньшей стоимостью. Что касается вспомогательных деталей (заклепки, болты, винты, гайки и т. д.), то они ничем не отличаются от применяемых в общем машиностроении.

*Ю. Четет.*

*IV. Электрические машины. История развития Э. м.* В 1831 г. Фарадем был открыт принцип электромагнитной индукции, на котором основано устройство всех Э. м. Первые источники тока обладали подковообразными стальными магнитами, относительно которых с помощью постороннего двигателя вращался железный „якорь“, снабженный обмоткой из медной проволоки. Первое техническое применение таких так наз. „магнито-электрических“ машин имело место в 1837 г. в Брюсселе, где Ноллет и ван-Малдерен оборудовали установку для освещения сигнальных башен. Ток, даваемый этими машинами, был переменный. Существенное улучшение в конструкцию магнито-электрических машин внес Вернер Сименс в 1856 г. благодаря изобретенному им якорю, имеющему форму двойного Т и состоящему из продолговатого железного цилиндра с двумя глубокими продольными впадинами для укладки проводников. Якорь вращался между полюсами нескольких плоских подковообразных магнитов. Такие машины и до настоящего времени сохранили свое значение в качестве источников слабого переменного тока (индукторы в телеграфии, магнет для двигателей внутреннего сгорания). Дальнейшим усовершенствованием явилось у тройство пластинчатого коллектора для выпрямления индуктируемого в якоре переменного тока в постоянный. Первая обмотка с коллектором, так наз. кольцевая, была предложена Пачинотти в 1860 г., но вскоре это изобретение было забыто. Сименс показал, что Э. м. обладает свойством обратимости, т. е. при питании ее током от постороннего источника она становится способной совершать механическую работу в качестве двигателя. В 1867 г. тот же Сименс построил динамо-электрическую машину, которая в отличие от магнито-электрической имела не постоянные магниты

а электромагниты, возбуждаемые током самой же машины (принцип самовозбуждения). В 1870 г. Грамм вторично изобрел кольцевую обмотку с коллектором. В 1872 г. конструктор фирмы Сименс и Гальске, Гейфнер-Альтенек, предложил вместо кольцевого барабанный якорь, у которого проводники располагались лишь на наружной поверхности и который применяется и в настоящее время. Дальнейшим крупным шагом было изобретение в 1885 г. Циперновским, Дери и Блати трансформатора, служащего для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный же ток другого напряжения. В 1891 г. Доливо-Добровольским был создан трехфазный асинхронный двигатель, основанный на принципе вращающегося магнитного поля, открытым Феррарисом и Тесла в 1888 г. С начала нынешнего столетия широко развивается применение для привода Э. м. паровой турбины, и возникает особый тип быстроходной Э. м., так наз. турбогенератор. Дальнейший прогресс в области электромашиностроения сводился к установлению точной теории, методов расчета, повышению мощности отдельных единиц, повышению мощности, приходящейся на единицу веса, повышению рабочего напряжения и наиболее рациональным конструкциям

**Классификация Э. м.** По назначению все Э. м. можно разделить на: генераторы электрической энергии (преобразующие механическую энергию в электрическую), электродвигатели (преобразующие электрическую энергию в механическую) и преобразователи (преобразующие электрическую энергию одного вида в электрическую же энергию другого вида). Такая классификация, однако, не всегда удобна, т. к. к одному и тому же типу здесь относятся машины совершенно различного устройства. Поэтому более удобным является разделение Э. м. по принципу устройства на машины постоянного тока и машины переменного тока, причем последние, в свою очередь, разделяются на: синхронные машины, трансформаторы, асинхронные машины, коллекторные машины и вращающиеся преобразователи. К Э. м. обычно относят

и ртутные выпрямители, хотя они не основаны на принципе электромагнитной индукции.

**Основные принципы устройства Э. м. Машины постоянного тока.** Схематическое устройство простейшей машины постоянного тока показано на рис. 1.

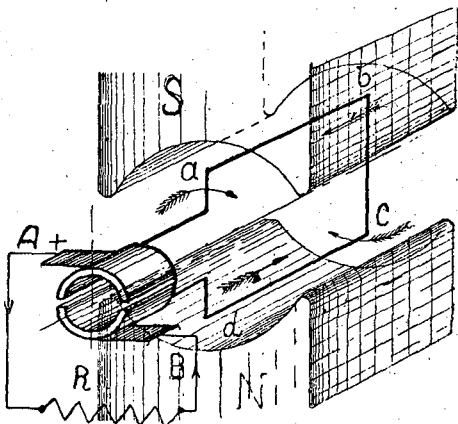


Рис. 1.

Между полюсами  $NS$  магнита (или электромагнита) вращается проводящая рамка  $abcd$ , концы которой соединены с двумя полукольцами (коллектору). К полукольцам прижимаются две «щетки»  $A, B$ , служащие для отвода тока во внешнюю цепь  $R$ . При вращении рамки, в ее сторонах  $ab$  и  $cd$ , по закону электромагнитной индукции, наводятся электродвижущие силы (эдс), которые в данный момент времени при данном расположении полюсов и данном направлении вращения (по часовой стрелке) направлены, как показано стрелками, т. е. от  $d$  к  $c$  и от  $b$  к  $a$ . Так как эти эдс действуют в одну и ту же сторону (в направлении от  $d$  к  $a$ ), то, сложившись, они установят во внешней цепи ток, идущий от щетки  $A$  в сопротивление  $R$  и возвращающийся через щетку  $B$  обратно в рамку. Через пол оборота, когда сторона  $cd$  станет под южным полюсом ( $S$ ), а сторона  $ab$  под северным ( $N$ ), эдс изменят свое направление на обратное. Так как, однако, теперь верхнее полукольцо перешло вниз, а нижнее — вверх, то ток во внешней цепи не изменит своего направления и будет продолжать идти от щетки  $A$  к щетке  $B$ . При даль-

нейшем полуобороте мы снова получим ту же картину, что на рис. 1. Так обр. данное устройство обладает способностью устанавливать во внешней цепи ток постоянного направления, т.е. постоянный ток. Отметим, что в моменты времени, когда стороны  $ab$  и  $cd$  находятся между полюсами (например, через  $\frac{1}{4}$  оборота после положения, показан. на рис. 1), эдс, наводимые в рамке, равны 0, т.к. при этом стороны рамки не перерезывают силовых линий. В этот момент и происходит переход щеток с одного полукольца на другое (т.н. коммутация тока). Очевидно, что ток во внешней цепи не будет сохранять свою величину неизменной за весь поворот рамки, а будет иметь пульсирующий характер, изменяясь от 0 до некоторого максимума. Величина эдс, индуктируемой в рамке, определяется формулой  $E = Blv \cdot 10^{-8}$  вольт, где  $B$  — магнитная индукция,  $l$  — длина подвергающегося индукции проводника (в данном случае  $ab + cd$ ) и  $v$  — линейная скорость движения рамки. Сила тока в сопротивлении  $R$  определяется формулой Ома:

$$I = \frac{E}{R + r} = \frac{Blv \cdot 10^{-8}}{R + r},$$

где  $R$  — сопротивление внешней цепи, а  $r$  — сопротивление внутренней цепи, т.е. самой рамки и контакта коллектор-щеток. Из последней формулы следует:  $IR + I_r = E$  или

$$I = \frac{E - I_r}{R} = \frac{V}{R};$$

здесь  $I_r$  называется падением напряжения в машине, а  $V = E - I_r$  — напряжением на внешних зажимах, или, просто, напряжением на зажимах машины. Устройство, показанное на рис. 1, не позволяет получить сколько-нибудь значительной эдс, и поэтому на практике прибегают к следующим мерам: подвергаемые индуктированию проводники располагают на железном цилиндре (якоре), вращающемся между полюсами, т.е. уменьшают магнитное сопротивление между полюсами; увеличивают длину провода, для чего берут не одну рамку, а несколько. На рис. 2 показан якорь с 4 рамками, из которых каждая для еще большего увеличения

длины провода состоит не из одного, а из нескольких витков проволоки. Коллектор здесь также состоит не из двух полуколец, а из 4 сегментов (по числу рамок). Помимо увеличения эдс, такая

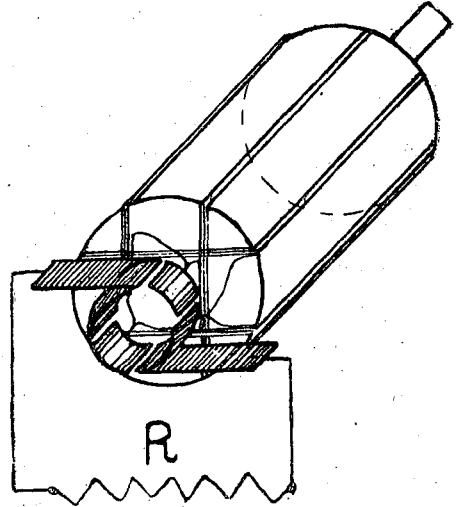


Рис. 2.

конструкция дает возможность получить значительно меньшие колебания тока. На практике число рамок берут еще большим (часто несколько сотен), и при этом колебания тока практически становятся равными нулю. Современные Э. м. постоянного тока устраиваются обычно не двухполюсными, как показано на рис. 1, а четырех- и т.д. полюсными, при чем электромагниты их питаются током, вырабатываемым

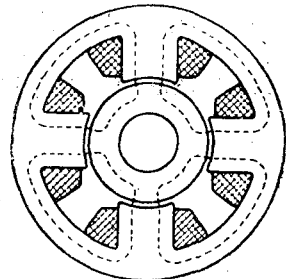


Рис. 3.

самой машиной. Совокупность проводочных рамок называется обмоткой якоря. Для более надежного укреплена

ния обмотки, а также для возможного уменьшения магнитного сопротивления между полюсами и якорем обмотка укладывается во впадины, имеющиеся на поверхности якоря. Совокупность всех железных частей машины, через которые проходит магнитный поток, называется магнитной цепью, или магнитопроводом. Типичный магнитопровод многополюсной (четырёхполюсной) машины показан на рис. 3.

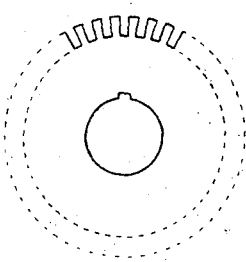


Рис. 3.

Неподвижную часть машины (полюса и ядро) называют еще индуктором. Пунктиром показаны пути прохождения магнитных силовых линий. Разрез якоря с впадинами показан на рис. 4. Коллектор состоит из отдельных медных сегментов, изолированных друг от друга слюдяными прослойками и собранных в виде цилиндра. Токособирающие щетки в современных машинах изготовляются из угля и располагаются в особых щеткодержателях, укрепленных на общей траверсе.

**Синхронные машины.** Если в конструкции, показанной на рис. 1, заменить оба полукольца (коллектор) двумя отдельными кольцами, к которым присоединены концы рамки (рис. 5) и на которые попрежнему наложены две неподвижные щетки, отводящие

ток во внешнюю цепь, то мы получим простейшую машину переменного тока. В момент времени, показанный на черт., ток из рамки поступает в щетку *B* и, пройдя внешнюю цепь *R*, через щетку *A* возвращается в рамку. Через пол оборота сторона *cd* переместится в положение *ab*, и теперь ток будет идти

во внешнюю цепь уже через щетку *A*, а возвращаться через *B*, т. е. направление тока в цепи изменится на обратное. В моменты времени, когда стороны *ab* и *cd* будут расположены между полюсами, в них не будут наводиться эдс, а следовательно и сила тока во внешней цепи (если она представляет собой чисто омическое сопротивление) будет равна 0. Таким образом, за время одного оборота рамки эдс будет от 0 увеличиваться до положительного максимума, снова падать до 0, опять увеличиваться до максимума, но уже отрицательного, и, наконец, снова принимать нулевое значение. Другими словами, за один оборот рамки будет иметь место один период изменения эдс (и тока). Если бы число полюсов нашей машины было равно 4, 6... $2p$ , то число периодов за один оборот было равно 2, 3... $p$ . Если рамка совершает в одну секунду  $\frac{n}{60}$  оборотов, где  $n$ —число оборотов в минуту, то частота вырабатываемого машиной

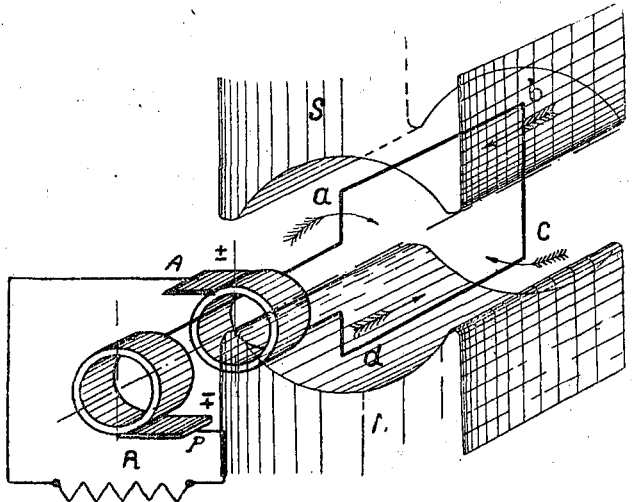


Рис. 5.

переменного тока, т. е. число периодов в секунду,

$$f = \frac{pn}{60}$$

где  $p$ —число пар полюсов машины. Отсюда очевидно, что, желая получить переменный ток постоянной частоты (в Европе стандартизована частота

$f = 50$  пер/сек, а в Америке  $f = 60$  пер/сек), мы должны вращать машину со строго постоянной скоростью, определяемой приведенной выше формулой (отсюда и наименование „синхронная машина“). При наименьшем возможном числе пар полюсов  $p = 1$  и частоте  $f = 50$  пер/сек, скорость вращения составляет 3.000 об/мин. Подобно машине постоянного тока, синхронные машины в техническом выполнении также снабжаются якорем и обмоткой, состоящей из многих проводников, уложенных во впадины этого якоря. Очертания полюсов и расположение проводов подбираются так, чтобы создаваемая машиной эдс имела синусоидальный характер изменения (см. теор. основы Э.). Если на якоре устроить не одну обмотку, а три

стvenное распространение получил трехфазный ток, и поэтому синхронные машины почти исключительно выполняются трехфазными. В настоящее время, по целому ряду соображений,

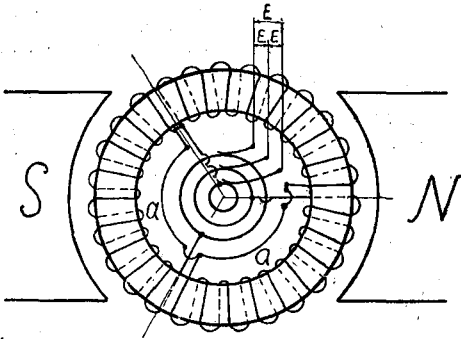


Рис. 6.

самостоятельных обмотки, занимающих каждая  $\frac{2}{3}$  полюсного деления (т.е. расстояния между серединами двух смежных полюсов), то мы получим трехфазную машину, создающую трехфазный ток. Если концы всех трех обмоток (фаз) соединить вместе, а начала подвести к трем кольцам, то получится соединение звездой (рис. 6). Если конец каждой фазы присоединить к началу следующей и точки соединения отвести к трем кольцам, то получится соединение треугольником (рис. 7). Подобным же образом можно осуществить четырех-, шести- и т. д. фазную машину. На практике преимуще-

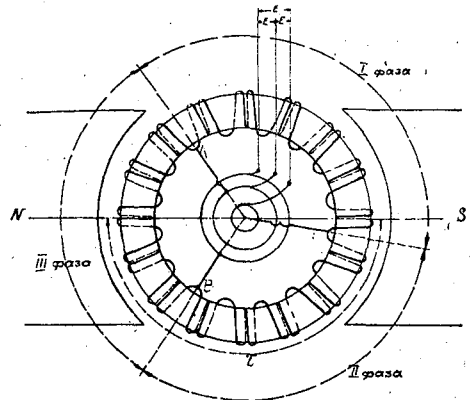


Рис. 7.

в синхронных машинах неподвижным устраивают якорь, представляющий в этом случае железное кольцо, на внутренней поверхности которого расположены во впадинах проводники. Индуктор, т.е. совокупность полюсов и соединяющего их ярма, вращается при этом внутри якоря. Никакого принципиального различия между такими машинами нет, так как по существу дела для получения индуктированной эдс необходимо лишь относительное перемещение проводников и силовых линий. Подобная синхронная

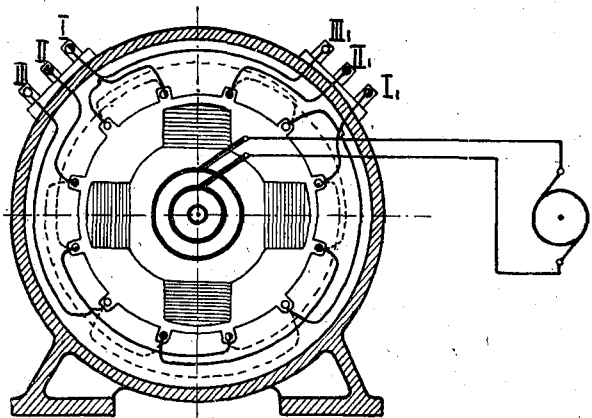


Рис. 8.

машина трехфазного тока показана на рис. 8. Здесь на валу машины имеется два кольца для подведения постоянного тока (от постороннего источника) к обмоткам электромагнитов. Зажимы (концы) обмотки якоря являются здесь неподвижными. На рис. 8 выведены все 6 концов обмотки (по два на каждую фазу) для возможности соединения их либо в звезду, либо в треугольник. Питание обмоток электромагнитов (возбуждение) происходит обычно от небольшой машины

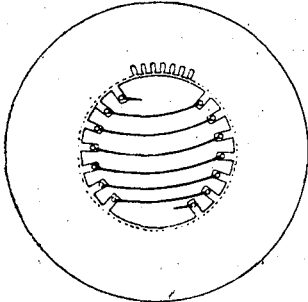


Рис. 9.

постоянного тока, сидящей на одном валу с индуктором главной машины. В очень быстроходных машинах большой мощности (турбогенераторах) с целью увеличения механической прочности индуктор устраивают в виде цилиндра с впадинами, в которые закладывается обмотка возбуждения. Разрез такой машины показан на рис. 9. Неподвижный якорь синхронных машин часто называют статором, а вращающийся индуктор — ротором. Машины по типу рис. 8 имеют ротор с ясно выраженными или выступающими полюсами, а машины по типу рис. 9 имеют ротор с неясно выраженными полюсами или с распределенной обмоткой возбуждения.

**Асинхронные машины.** Поместим во внутрь обычного трехфазного статора синхронной машины ротор, показанный на рис. 10 и состоящий из ряда медных стержней, соединенных по бокам медными кольцами. Вся эта конструкция расположена на железном цилиндре, так что стержни утоплены во впадинах, а кольца расположены по торцам цилиндра. Такой ротор на-

зывают часто ротором в виде беличьего колеса. Если теперь к обмотке статора подвести трехфазный переменный ток, то, как известно, внутри машины возникнет вращающееся магнитное поле (см. теор. основы Э.). Это поле, пересекая обмотку ротора, создаст в ней ток, который, взаимодействуя с полем, вызовет, по закону Био-Савара, вращение ротора, в результате чего получится электродвигатель, способный совершать механическую работу. Очевидно, что скорость вращения ротора никогда не сможет стать равной скорости вращения поля, т. к. в противном случае ротор и поле находились бы во взаимном покое, никакого пересечения проводниками силовых линий не было бы, а следовательно, исчезла бы причина, заставляющая ротор вращаться. Таким образом скорость вращения ротора всегда меньше скорости вращения поля, определяемой уже знакомой нам формулой

$$n = \frac{60f}{p},$$

т. е. ротор вращается асинхронно (не синхронно) с полем, откуда произошло и название машины. Разница между скоростями поля и ротора называется скольжением последнего. Величина скольжения увеличивается с нагрузкой машины, т. е. скорость вращения при нагрузке уменьшается. Впрочем, разница между скольжением при нагрузке и скольжением при холостом ходе невелика и у современных машин составляет лишь несколько процентов. Как мы увидим впоследствии, в некоторых случаях необходимо бывает на некоторый промежуток времени увеличивать сопротивление ротора. Для этой цели роторные обмотки асинхронных машин часто устраивают так же, как и статор-

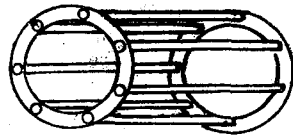


Рис. 10.

ные, т. е. в виде трехфазной обмотки, концы фаз которой подведены к трем сидящим на валу и изолированным друг от друга кольцам. Тогда при посред-

стве трех неподвижных щеток можно присоединять к ротору добавочное сопротивление любой величины (реостат). При ненадобности в добавочном сопротивлении, щетки замыкают между собой накоротко, при помощи особого рычага. Подобные роторы называются фазовыми, или роторами с контактными кольцами. Разрез через статор и ротор асинхронной машины показан на рис. 11.

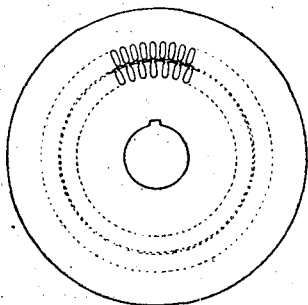


Рис. 11.

**Коллекторные машины переменного тока.** Эти машины отличаются большим многообразием, и принципы устройства и работы их основных типов будут изложены при рассмотрении их теории.

**Вращающиеся преобразователи.** Простейшими вращающимися преобразователями являются мотор-генераторы, состоящие из двух связанных между собой непосредственно или с помощью зубчатой или иной передачи машин: электродвигателя (например, асинхронного) и генератора (например, постоянного тока). В этом случае, подводя к двигателю переменный ток, мы заставляем его вращать генератор, вырабатывающий постоянный ток (или наоборот). Можно, однако, объединить обе машины в одну, и тогда мы получим одноякорный преобразователь, схематическое устройство которого показано на рис. 12. Из чертежа видно, что здесь между двумя электромагнитами вращается якорь, обмотка которого, с одной стороны (слева), присоединена к трем кольцам, а с другой стороны (справа) — к коллектору. Если подвести постоянный ток к коллектору, то якорь придет во вращение и на кольцах появится напряжение переменного тока,

т.е. мы получим совмещение в одной машине двигателя постоянного тока и синхронного генератора. Подводя к кольцам переменный ток и снимая с коллектора постоянный, мы получаем совокупность синхронного двигателя и генератора постоянного тока.

**Трансформаторы.** Преобразование переменного тока одного напряжения в переменный ток той же частоты, но иного напряжения может происходить с помощью трансформатора. На железном сердечнике (рис. 13) находятся, в случае однофазного трансформатора, две обмотки: первичная (1), с числом витков  $w_1$ , и вторичная (2), с числом витков  $w_2$ . Если присоединить первичную обмотку к сети переменного тока с напряжением  $V_1$ , то, по закону электромагнитной индукции, в любой момент времени

$$v_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

где  $v_1$  — мгновенное значение напряжения сети,  $\Phi$  — магнитный поток в сердечнике, устанавливаемый током, протекающим по обмотке. Это уравнение строго справедливо при холостом ходе,

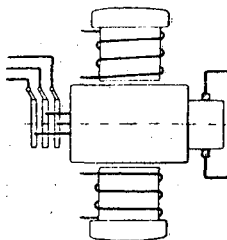


Рис. 12.

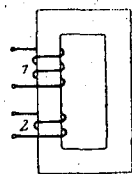


Рис. 1

когда потерей напряжения в обмотках можно пренебречь. Т. к. вторичная обмотка пронизывается почти тем же потоком, что и первичная, то при холостом ходе на зажимах вторичной обмотки появится напряжение

$$v_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Разделив первое у-ние на второе, найдем, что

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{w_1}{w_2} = u,$$

т.е. напряжения на зажимах обмоток относятся как числа витков этих обмоток. Отношение  $w_1 : w_2 = u$  называется коэффициентом трансформации, или



передаточным числом трансформатора. При нагрузке вторичной цепи в обмотках возникают падения напряжения, благодаря чему отношение напряжений несколько (хотя и очень мало) изменяется. Для преобразования многофазных токов можно

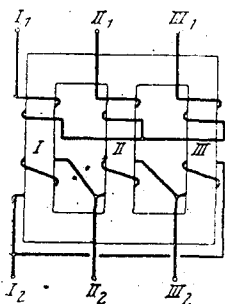


Рис. 14.

взять несколько (по числу фаз) однофазн. трансформаторов и соединить их обмотки в звезду или многоугольник. Однако, в большинстве случаев, многофазные трансформаторы устраивают так, как показано на рис. 14, т.е. обмотки всех фаз (в данном случае трех) располагают на общем сердечнике.

**Ртутные выпрямители.** Устройство ртутных выпрямителей основано на принципе выпрямляющего свойства вольтовой дуги (см. теор. основы Э.). Эти аппараты служат для преобразования переменного тока в постоянный и в последнее время являются серьезными конкурентами вращающихся преобразователей.

**Обмотки Э. м.** Обмотки машин постоянного тока состоят из ряда витков, соединенных друг с другом и с сегментами (пластинами) коллектора. На практике витки укладываются во впадины, но мы первоначально, для более наглядного изображения, будем представлять их расположенными на поверхности якоря.

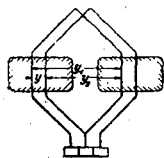


Рис. 15.

Для того, чтобы в витке индуктировалась наибольшая эдс, его ширину берут, по возможности, равной полному делению (т.е. расстоянию между серединами смежных полюсов, измеренному на поверхности якоря). Существует два типа обмоток: петлевая и волновая. На рис. 16 показана часть петлевой обмотки (поверхность якоря развернута в плоскость). Здесь имеется два витка, соединенных последовательно,

при чем, как видно из чертежа, второй виток лежит под теми же двумя полюсами, что и первый. На рис. 16 показана часть волновой обмотки. Здесь последовательно соединенные витки

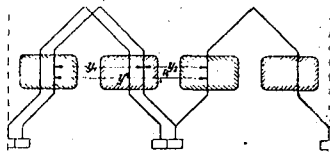


Рис. 16.

лежат под разными полюсами. Часть обмотки, лежащая между двумя коллекторными пластинами, следующими друг за другом при обходе обмотки, называется элементом, или секцией. На рис. 15 и 16 каждая секция состоит из одного витка, но она может состоять и из нескольких, как показано на рис. 17 для волновой обмотки (здесь секция состоит из трех витков). Каждая сторона секции называется активной стороной. Расстояние между начальными

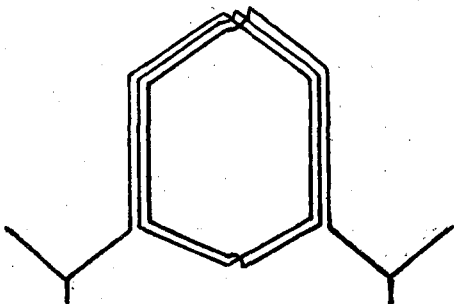


Рис. 17.

сторонами двух секций, следующих друг за другом при обходе обмотки, называется результирующим шагом  $y$  (см. рис. 15 и 16). Кроме того, в обмотке различают еще: первый частичный шаг  $y_1$ , равный расстоянию между начальной и конечной сторонами одной и той же секции, и второй частичный шаг  $y_2$ , равный расстоянию между конечной стороной одной секции и начальной стороной другой. Из рис. 15 и 16 следует, что в петлевой обмотке частичные шаги делают в разные стороны и  $y = y_1 - y_2$ , а в волновой обмотке их делают в одну сторону и  $y = y_1 + y_2$ . Шаги измеряются не единицами дли-

ны, а числом пропущенных промежутков между активными сторонами, так как важно знать не абсолютное расстояние (см, мм...), а с каким проводником следует соединить тот или иной проводник обмотки. Кроме обмоточных шагов, для выполнения обмотки необходимо знать шаг по коллектору  $y_k$ , указывающий расстояние между коллекторными пластинами, к которым присоединены концы одной секции. Шаг по коллектору измеряется числом пропущенных изоляционных прослоек между пластинами. Число секций обмотки равно числу коллекторных пластин, т. к. конец одной секции и начало следующей присоединены к одной и той же пластине. Если  $N$  — число проводников обмотки,  $S$  — число активных сторон и если активная сторона секции состоит из одного проводника, то  $S = N$ , если же она состоит из

$W$  проводников, то  $S = \frac{N}{W}$ . Так как секция состоит из двух активных сторон; а число секций равно числу коллекторных пластин  $K$ , то  $S = 2K$ . Число активных сторон очевидно должно быть четным, а число коллекторных пластин может быть четным и нечетным. Отметим, что для всех барабанных обмоток результирующий шаг  $y$  всегда вдвое больше шага по коллектору  $y_k$ , т. е.  $y = 2y_k$ . Петлевые, иначе параллельные, обмотки делятся на простые и многократные. В простой петлевой обмотке результирующий шаг всегда равен 2, т. е.  $y = \pm 2$  и, следовательно, шаг по коллектору  $y_k = \pm 1$ . Шаги  $y$  и  $y_k$  получают отрицательными в том случае, если  $y_2 > y_1$ . Обмотки с отрицательными  $y$  и  $y_k$  называются перекрещенными. На рис. 18 показана секция перекрещенной обмотки. Четырехполюсная петлевая обмотка показана на рис. 19, а на рис. 20 дана ее развернутая схема. Данные этой обмотки:  $S = N = 22$ ;  $K = 11$ ;  $y_1 = 5$ ;  $y_2 = 3$ ;  $y = +2$ ;  $y_k = -1$ . В простых петлевых обмотках число параллельных ветвей всегда равно числу полюсов, т. е.  $2p = 2a$ , где  $2p$  — число полюсов, а  $2a$  — число параллельных ветвей. При данном положении щеток мы имеем следующие параллельные ветви: 1) левая отриц. щетка; пластина 11, проводники 2, 19, 22, 17,

пластина 4, левая полож. щетка; 2) левая отриц. щетка, пластина 1, проводники 1, 6, 3, 8, пластина 3, левая полож. щетка; 3) правая отриц. щетка, пластина 6, проводники 11, 16, 13, 18, пластина 8, правая полож. щетка; 4) правая отриц. щетка, пластина 6, провод-



Рис. 18.

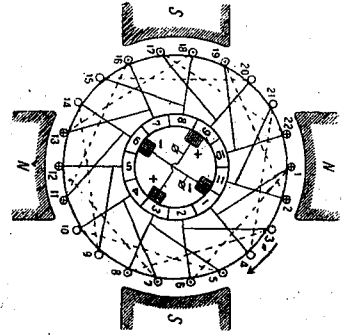


Рис. 19.

ники 14, 9, 12, 7, пластина 9, правая полож. щетка. Проводники 15—20, 5—10 и 4—21 замкнуты щетками накоротко и в образовании эдс не участвуют (в данный момент времени). Частичные шаги обмотки должны всегда выражаться нечетными числами. Так как  $y = 2$ , а  $y_1 - y_2 = y$ , то для того чтобы разность  $y_1 - y_2$  была равна четному числу,  $y_1$  и  $y_2$  должны быть или оба

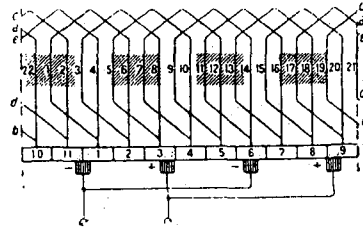


Рис. 20.

четными, или оба нечетными. При четных частичных шагах мы обошли бы, однако, только четные активные стороны, если бы начали с нечетной, или, наоборот, только нечетные, если бы начали с четной стороны. Поэтому  $y_1$  и  $y_2$  должны быть обязательно нечетными. Первый частичный шаг, равный ширине секции, должен быть близок к полюсному делению или равняться ему, для того чтобы эдс, индуцируемая в секции, имела наибольшую

возможную величину. Если выразить полюсное деление числом промежутков между активными сторонами, то оно равно  $\frac{S}{2p}$ , следовательно

$$y_1 \approx \frac{S}{2p}$$

Обычно пишут

$$y_1 = \frac{S \mp b}{2p},$$

где  $b$ —произвольное число (обычно наименьшее), делающее  $y_1$  целым и нечетным. Если  $S$  при делении на  $2p$  дает целое нечетное число и если мы берем  $y_1 = \frac{S}{2p}$ , то обмотка в этом случае называется диаметральной. Тогда, очевидно,  $b = 0$ . Если же  $b$  не равно нулю, то обмотка называется хордовой. Эти названия были даны обмоткам применительно к двухполюсным машинам, у которых в первом случае стороны секции располагаются по концам диаметра якоря, а во втором случае—по концам хорды. Если обозначить общий ток, проходящий через якорь, через  $I_a$ , то ток в одной параллельной ветви обмотки будет  $i_a = \frac{I_a}{2a} = \frac{I_a}{2p}$  (т. к. для простой петлевой обмотки  $2a = 2p$ ).

Величиной этого тока определяется сечение проводника, из которого должна быть изготовлена обмотка. Проводник будет тем толще, чем больше ток  $i_a$ . На практике редко берут  $i_a$  больше, чем 200 ампер. В машинах, имеющих петлевую обмотку,  $i_a$  можно уменьшить путем увеличения числа полюсов (т. к. при этом одновременно увеличивается и число параллельных ветвей). Но в машинах малой и средней мощности невыгодно брать большое число полюсов и поэтому, если  $i_a$  при данном числе полюсов выходит больше 200 ампер, приходится брать многократную петлевую обмотку, которая позволяет увеличить число параллельных ветвей в  $i$  раз, т. е. здесь  $2a = i2p$ . Идея этой обмотки понятна из рис. 21. Здесь имеется две простых петлевых обмотки, из которых одна как бы вдвинута в

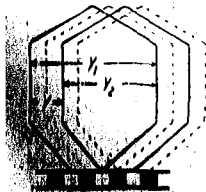


Рис. 21.

из которых одна как бы вдвинута в

другую. Достигается это тем, что шаг по коллектору берут здесь равным не  $\pm 1$ , а  $\pm i$  (где  $i$ —число отдельных обмоток, которое желательно получить). Начав обход с какой-либо пластины,

мы обойдем только  $\frac{1}{i}$  часть всех проводников, а  $\frac{i-1}{i}$  останутся свободными.

Начав с другой свободной пластины, мы снова обойдем  $\frac{1}{i}$  часть проводников, и т. д. При этом получится  $i$  самостоятельных обмоток, из которых каждая имеет  $2a = 2p$ , а, следовательно, всего получится  $i \cdot 2p$  параллельных ветвей. При этом необходимо, чтобы ширина щетки была бы по крайней мере в  $i$  раз больше ширины одной пластины. На рис. 21  $i = 2$ . Такие обмотки называются петлевыми многократно замкнутыми. Формулы для них:

$$2a = i \cdot 2p; y_k = \pm i; y = \pm 2i; y_1 = \frac{S \mp b}{2p}; y_2 = y_1 - y.$$

Как уже указывалось, гладкие якоря в настоящее время не применяются. Однако, формулы обмоток остаются теми же и для зубчатых якорей, если определенным образом пронумеровать активные стороны во впадинах. Практические обмотки машин постоянного тока всегда выполняются двухслойными. Стороны верхнего слоя (см. рис. 22)

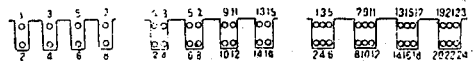


Рис. 22.

всегда нумеруются нечетными, а нижнего слоя—четными цифрами. Катушка, которая может состоять и из нескольких элементов, изготовленная предварительно на шаблоне, закладывается во впадины таким образом, чтобы одна ее сторона лежала в верхнем, а другая—в нижнем слое (см. рис. 23). Стороны катушки тщательно изолируются как от стенок впадины, так и между собой. Для предохранения обмотки от выбрасывания из впадины, в верхнюю часть последней закладывается деревянный или фибровый клин, имеющий в разрезе форму ласточкина хвоста. Разрез через впадину с обмоткой и

клином показан на рис. 24. Результирующий шаг волновой обмотки  $y = y_1 + y_2 = 2y_k$ , как и в петлевой обмотке должен быть четным числом, а частич-

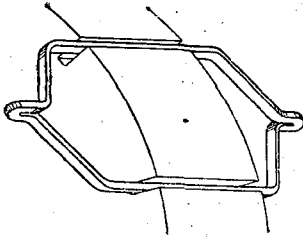


Рис. 23.

ные шаги  $y_1$  и  $y_2$  — числами нечетными. Волновая обмотка может быть выполнена так, что при любом числе полю-

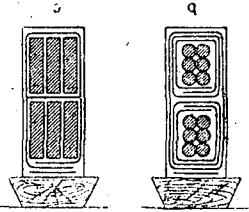


Рис. 24.

сов число параллельных ветвей будет равно 2 ( $2a = 2$ ). Такая обмотка называется простой волновой или последовательной. На рис. 25 показана часть последовательной обмотки зубчатого

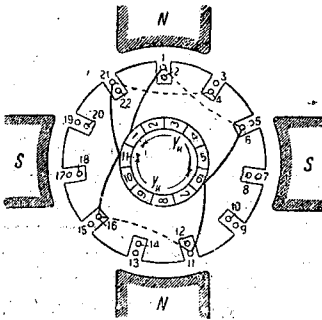


Рис. 25.

якоря. Если начать обходить коллектор, например, с пластины 1, то, сделав один круговой обход, мы должны попасть в пластину 2 или 11, а не в 1, т. к. иначе обмотка замкнулась бы уже после первого обхода. Из рис. 25 видно,

что между началом и концом первого обхода остается одна изоляционная прослойка на коллекторе; следовательно, если  $p$  — число пар полюсов, то  $y_k \cdot p \pm 1 = K$ . Продолжая обмотку, мы после каждого обхода будем сдвигаться на одну коллекторную пластину и, наконец, обойдя все проводники и все пластины, вернемся в исходное положение и замкнем обмотку. Из найден-

ной формулы следует, что  $y_k = \frac{K \mp 1}{p}$  или, так как  $y = 2y_k$ , то  $y = \frac{2K \mp 2}{p} = \frac{S \mp 2}{p}$ . Первый частичный шаг  $y_1 \cong \frac{y}{2}$ .

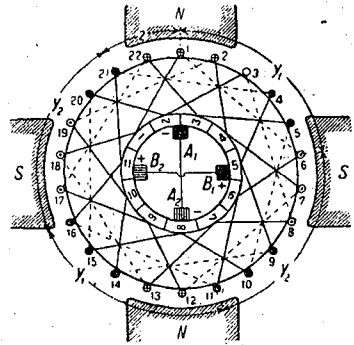


Рис. 26.

а второй частичный шаг  $y_2 = y - y_1$ . Четырехполюсная волновая обмотка показана на рис. 26, а ее развертка на рис. 27.

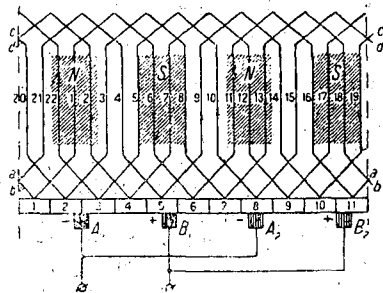


Рис. 27.

Ее данные:  $S = N = 22$ ;  $K = 11$ ;  $2p = 4$ ;  $2a = 2$ ;  $y = \frac{S \mp 2}{p} = \frac{22 - 2}{2} = 10$ ;  $y_k = \frac{y}{2} = 5$ ;  $y_1 = 5$ ;  $y_2 = y - y_1 = 5$ . Если на коллектор наложены только 2 щетки

(А, В), то получаются следующие 2 параллельные ветви: 1) щетка А<sub>1</sub>, пластина 2, проводники 3, 8, 13, 18, 1, 6, пластина 6, щетка В; 2) щетка А<sub>1</sub>, пластина 3, проводники 22, 17, 12, 7, 2, 19, 14, 9, пластина 5, щетка В<sub>1</sub>. Проводники 20—15, 5—10, 16—11 и 12—4 замкнуты накоротко. Кроме двух необходимых, можно установить еще дополнительные щетки А<sub>2</sub>, В<sub>2</sub> (так, чтобы полное число щеток было равно числу полюсов). При этом снова получается только 2 параллельные ветви: 1) щетка А<sub>1</sub>, пластина 2, проводники 3, 8, 13, 19, 1, 6, пластина 6, щетка В; 2) щетка А<sub>1</sub>, пластина 3, проводники 22, 17, 12, 7, 2, 19, пластина 10, щетка В<sub>2</sub>. Секции 20—15, 5—10, 16—11, 21—4, 14—9—замкнуты накоротко. Для волновой обмотки, следовательно, можно, независимо от числа полюсов, взять только 2 щетки, но на практике почти всегда устанавливают число щеток равное числу полюсов, исходя из следующих соображений: при большем числе щеток на каждую из них приходится меньший ток, следовательно, при данной ширине (щетка не должна перекрывать больше 2—3 пластин) осевая длина щетки выходит меньше и коллектор короче. Кроме того, при наличии полного (=2р) числа щеток, машина работает более надежно в отношении искрения на коллекторе. При желании получить в волновой обмотке число параллельных ветвей >2, можно разместить на якоре несколько простых самостоятельных обмоток, т. е. устроить многократную волновую обмотку (принцип устройства тот же, что и для многократной петлевой обмотки). Отдельные обмотки включаются щетками параллельно, откуда еще другое название этой обмотки: последовательно-параллельная. Здесь также можно обойтись всего двумя щетками (соответственно увеличив их ширину), но и здесь, обычно, берут число щеток равным числу полюсов. При выполнении многократной волновой обмотки, между началом и концом каждого обхода должно оставаться а изоляционных прослоек; если мы хотим иметь а самостоятельных обмоток, т. е. всего 2а параллельных ветвей. Тогда здесь можно найти

сать:  $py_k = K \pm a$ , откуда  $y_k = \frac{K \pm a}{p}$  и  $y = \frac{2K \pm 2a}{p} = \frac{S \pm 2a}{p}$ . Частичные шаги находятся, как и для простой волновой обмотки, по формулам:  $y_1 \cong \frac{y}{2}$ ;  $y_2 = y - y_1$ . Нетрудно видеть, что формула  $y = \frac{S \pm 2a}{p}$  является общей для всех волновых обмоток, т. к. при  $2a = 2$  она переходит в известную уже нам формулу  $y = \frac{S \pm 2}{p}$  для простой волновой обмотки.

В случае, если в параллельных ветвях обмотки будут индуктироваться неодинаковые эдс, то в самой обмотке будут протекать уравнительные токи. Эти уравнительные токи будут замыкаться через щетки и создавать для них дополнительную нагрузку, что может вызвать искрение на коллекторе. Чтобы избежать этого, устраивают уравнительные или эквипотенциальные соединения, связывающие те точки обмотки, которые при одинаковых эдс в параллельных ветвях имели бы одинаковые потенциалы. Такие точки могут быть только в обмотках с числом параллельных ветвей большим 2. Шаг для уравнительных соединений по коллектору равен  $\frac{K}{a}$  изоляционных прослоек, т. е.  $n$ -ую пластину нужно соединять с  $\left[ n + \frac{K}{a} \right]$  и т. д. Уравнительные соединения чаще всего встречаются в петлевых обмотках больших машин. Соединять можно было бы каждую пластину, но это вызвало бы большие расходы на медь. Поэтому обычно уравнительные соединения делают, пропуская 3—4 пластины. За один оборот якоря проводник перережет  $2p\Phi$  силовых линий, а в секунду  $2p\Phi \frac{n}{60}$ , где  $n$ —число оборотов якоря в минуту. Так как величина эдс между щетками определяется числом проводников в одной параллельной ветви обмотки, то эдс на щетках будет больше, чем в одном проводнике в  $\frac{N}{2a}$  раз. Таким образом эдс машины постоянного тока

определяется формулой

$$E = \frac{p}{a} \frac{n}{60} \Phi N \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

*Обмотки машин переменного тока.*

Если на рис. 5, изображающем простейшую машину переменного тока, окружная скорость перемещения рамки относительно магнита будет  $v$  см/сек, то число силовых линий, перерезанных каждой стороной витка (т.е.  $ab$  или  $cd$ ) в течение одной секунды, будет равно  $Blv$ , где  $B$ —магнитная индукция, а  $l$ —длина проводника в направлении оси вращения. Число силовых линий, перерезанных в 1 сек. обеими сторонами рамки, будет вдвое больше, т.е.  $2Blv$ . Этому же значению численно равна и величина эдс, индуцированной в рамке. Обозначая эту эдс через  $e$  и вводя множитель  $10^{-8}$ , чтобы получить результат в вольтах, найдем, что

$$e = 2 Blv \cdot 10^{-8}.$$

Если рамка будет состоять не из одного витка, как на рис. 5, а из  $w_1$  витков, при чем толщина проволоки будет столь незначительной, что можно будет считать, что все витки одновременно проходят мимо какого-либо места на поверхности полюса (например, мимо его края) то эдс будет в  $w_1$  раз больше и станет равной  $e = 2Bw_1lv \cdot 10^{-8}$ . Если взять не двухполюсную конструкцию, а, например, четырехполюсную, то вместо одной рамки можно взять две соединенных последовательно, при чем составляющие их стороны в любой момент времени будут занимать одинаковое положение относительно полюсов, т.е. в любой момент времени во всех проводниках будут индуцироваться одинаковые эдс. Для всей обмотки эдс будет вдвое больше, чем в предыдущем случае. Если вообще взять не 2, а  $2p$  полюсов, то эдс будет в  $p$  раз больше, чем при двухполюсной конструкции, т.е.

$$e = 2 Blv \cdot w_1 p \cdot 10^{-8} \text{ вольт.}$$

Как уже указывалось, обмотка всегда укладывается во впадинах железного якоря. Если его диаметр равен  $D$  и число оборотов в минуту  $n$ , то окружная скорость

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}. \text{ Т. к. } \pi D = 2p\tau, \text{ где } \tau \text{—по-}$$

люсное деление, то  $v = \frac{2p\tau n}{60}$ . Обо-

значив полное число витков обмотки через  $w = w_1 p$ , мы найдем, что

$$e = 4 \cdot Blw\tau \frac{pn}{60} 10^{-8} \text{ вольт. Т. к. } \frac{pn}{60}$$

равно частоте  $f$ , то  $e = 4 Blw\tau f 10^{-8}$ . Эта формула дает мгновенные значения эдс. Среднее значение найдем, подставив среднюю индукцию  $B_m$ .

Тогда  $e_m = 4B_m lw\tau f \cdot 10^{-8}$ . Т. к.  $B_m \tau$

равно потоку одного полюса— $\Phi$ , то  $e_m = 4w\tau f \Phi 10^{-8}$ . Т. к. эффективное значение эдс  $E = k_f \cdot e_m$ , где  $k_f$ —коэффициент формы кривой (см. теор. основы Э.), то  $E = 4k_f w\tau f \Phi \cdot 10^{-8}$ . Для синусоидальной кривой  $k_f = 1,11$  и  $E =$

$= 4,44w\tau f \Phi \cdot 10^{-8}$  вольт. До сих пор мы рассматривали случай, когда число витков было равно числу полюсов или

когда при большем числе витков толщина проволоки была весьма малой. На практике, однако, с целью лучшего использования поверхности якоря и с целью получения синусоидальной кривой эдс, витки обмотки располагают не в  $2p$  впадинах, а

в  $2p \cdot q$ , где  $q$  представляет собой число впадин на полюс. Если по-

прежнему в каждую впадину поместить  $w_1$  витков, то окажется, что эдс всей обмотки будет теперь не в

$w = w_1 p q$  раз больше, чем в формуле  $e = 2 Blv \cdot 10^{-8}$ , а в  $k_w w = k_w w_1 p q$ , где  $k_w$  представляет собой обмоточный коэффициент, всегда меньший единицы. Происходит это потому, что

если на полюс приходится несколько впадин, то эдс, индуцированные в проводниках, расположенных в этих впадинах, не будут одновременно достигать одинаковых значений, так как индукции для каждой впадины будут различными. Если машина будет не однофазной, а  $m$ -фазной, то при желании получить в каждой фазе эдс, определяемую приведенными выше формулами, необходимо взять для каждой фазы число витков  $w$ , т.е. взять число впадин в  $m$  раз больше. Тогда число впадин будет не  $2p q$ , а  $2p m q$ , где  $q$ —будет теперь числом впадин на полюс и фазу. Величина

обмоточного коэффициента определяется формулой

$$k_w = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}}$$

Таким образом, в общем случае, когда число впадин на полюс и фазу не равно единице, величина эдс, наводимой в каждой фазе обмотки, составляет  $E = 4k_w k_{wf} w \Phi 10^{-8}$  или, при синусоидальной форме,  $E = 4,44 k_w k_{wf} w \Phi 10^{-8}$ . В нормальных трехфазных машинах обычно  $q = 3 \dots 8$  и  $k_w = 0,96 \dots 0,956$ . Если каждая впадина содержит лишь один проводник, то такая обмотка называется стержневой и применяется обычно для машин, рассчитанных на большую силу тока. В машинах, рассчитанных на небольшую силу тока, применяют обычно катушечную обмотку, у которой в каждую впадину заложено несколько тонких проводников. Кроме этих двух типов обмоток, для синхронных и асинхронных машин применяются еще так называемые американские обмотки, описание которых будет дано ниже и которые представляют собой модификацию обмоток постоянного тока (но без коллектора). Для роторов асинхронных двигателей применяют гл. обр. два типа обмоток—двухслойные обмотки и короткозамкнутые обмотки (см. ниже). Наконец, для роторов коллекторных двигателей применяют обычные обмотки постоянного тока или сложные обмотки, состоящие из нескольких обмоток различных типов. Трехфазные обмотки соединяются или в звезду, или в треугольник. В первом случае напряжение на зажимах машины (линейное напряжение)  $V = E\sqrt{3}$ , где  $E$ —напряжение одной фазы (фазовое напряжение), а линейный ток  $I = i$ , где  $i$ —фазовый ток. Во втором случае  $V = E$  и  $I = i\sqrt{3}$ . Чаще всего применяется соединение звездой, т. к. при этом достигается большее приближение к синусоиде и, кроме того, фазовое напряжение значительно (в  $\sqrt{3} \approx 1,73$  раз) меньше линейного, благодаря чему изоляция машины упрощается и удешевляется. Часто, особенно у асинхронных двигателей, вы-

водят все шесть обмоточных концов для того, чтобы иметь возможность соединить обмотку звездой или треугольником, в зависимости от напряжения сети (напр., при  $V = 120$  в.—треугольник, при  $V = 210$  в.—звезда). Та часть обмотки, которая расположена во впадине (находится между линиями 1 и 2 на рис. 23, 30, 32), является активной частью, так как участвует в получении эдс. Та же часть, которая находится вне железа, непосредственного участия в образовании эдс не принимает и служит для соединения между собой активных проводников. Эти части обмотки называются торцевыми, или лобовыми, соединениями. Так как в трехфазных обмотках катушки отдельных фаз частью находят друг на друга, то для возможности устройства обмотки лобовые соединения не могут располагаться в одной плоскости, а должны быть отогнуты друг от друга. Если лобовые части лежат в двух плоскостях (как показано на рис. 28), то такая обмотка называется двухэтажной. Если рис. 28 разрезать

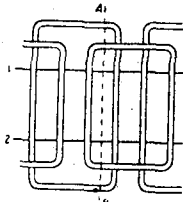


Рис. 28.

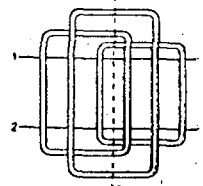


Рис. 30.

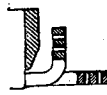


Рис. 29.

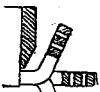
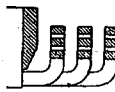
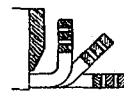


Рис. 31.

по линии  $AB$ , то можно представить себе три способа отгибания лобовых частей, показанные на рис. 29. Если лобовые части расположены в трех плоскостях, то обмотка называется трехэтажной (рис. 30 и 31). Иногда все

катушки получают одинаковую форму, как показано на рис. 32. Тогда лобовые соединения изгибаются по одному из способов рис. 33. Схема двухэтажной катушечной обмотки представлена на рис. 34. Отдельные фазы показаны различной штриховкой. Число впадин на полюс и фазу здесь  $q = 2$ , и число полюсов  $2p = 4$ . Первая фаза

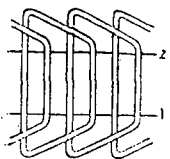


Рис. 32.

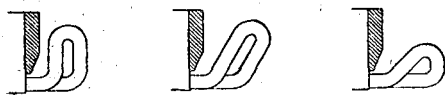


Рис. 33.

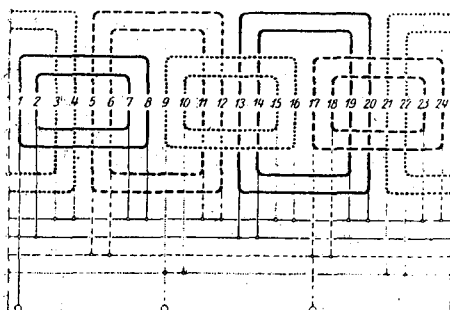


Рис. 34.

сдвинута от второй на  $\frac{2}{3}$  полюсного деления (что в двухполюсной машине соответствует 120 градусам), вторая от третьей—также на  $\frac{2}{3}$  полюсного деления. Тонкими линиями показаны соединения отдельных катушек (из которых каждая может состоять из нескольких витков). Вся обмотка соединена в звезду. На рис. 35 показана

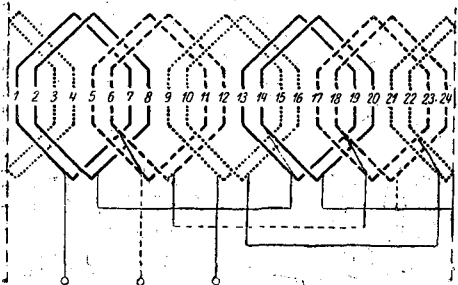


Рис. 35.

обмотка с теми же данными, но имеющая одинаковые катушки, чем достигается выравнивание сопротивлений и индуктивностей отдельных фаз. На рис. 36 изображена двухслойная обмотка, снова с теми же данными. Этот тип обмотки, выполняемый технически точно так же, как и обмотки постоянного тока (но без коллектора), был прежде широко распространен лишь

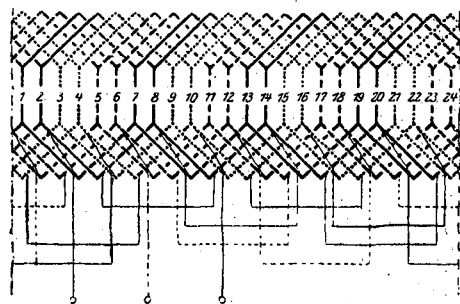


Рис. 36.

в Америке (отсюда и название этой обмотки „американская“), а в настоящее время завоевал себе прочное положение и в Европе благодаря целому ряду положительных качеств. При больших силах тока сечения проводников полу-

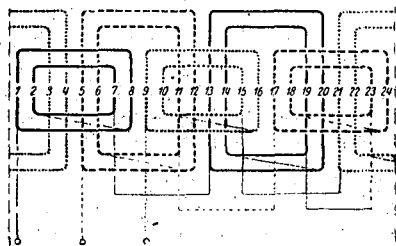


Рис. 37.

чаются столь значительными, что изготовление катушечной обмотки затрудняется. В этих случаях приходится или прибегать к параллельному соединению отдельных катушек между собой, или устраивать обмотку в виде стержневой. Обмотка с параллельным соединением катушек показана на рис. 37. Здесь  $2p = 4$ ,  $q = 2$  и в каждой фазе по 4 катушки соединены между собой параллельно. Так. обр. сечение проводника рассчитывается здесь на силу тока в 4 раза меньшую, чем весь ток



машины. Стержневые обмотки, как показывает уже их название, выполняются не из тонкого провода, а из отдельных изолированных стержней, закладываемых во впадины и соединяемых по торцам припаянными или приваренными перемычками. Типичная стержневая обмотка для  $2p=4$ ,  $q=4$  показана на рис. 38 (для ясности здесь вычерчена лишь одна фаза). При очень больших силах тока и стержневые обмотки состояются иногда из 2 или нескольких параллельных ветвей.

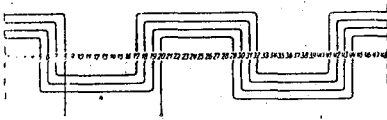


Рис. 38.

В качестве обмоток для синхронных и асинхронных машин могут применяться и обычные обмотки постоянного тока (без коллектора). Так, напр., если взять многополюсную волновую (последовательную) обмотку и подвести трехфазный ток к трем точкам, отстоящим друг от друга на одинаковое число проводов в порядке их последовательного соединения, то мы получим трехфазную обмотку, соединенную в треугольник. Если ток подведен к двум точкам, то получается однофазная обмотка и, наконец, если подвести шестифазный ток к 6 точкам, то получится обмотка шестифазная. Обмотка постоянного тока может быть представлена в виде многоугольника (потенциальный многоугольник), стороны которого по величине и направлению изображают эдс, наводимые в смежных проводах. При встречающемся на практике большом числе проводов

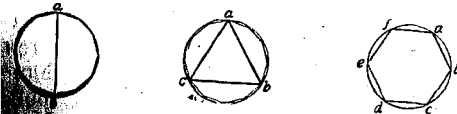


Рис. 39.

многоугольник практически превращается в окружность. На рис. 39 изображены многоугольники для обмоток однофазной, трехфазной и шестифазной. Диаметр  $ad$  (для однофазной об-

мотки), хорды  $ab$ ,  $bc$ ,  $ca$  (для трехфазной обмотки) и  $ab$ ,  $bc$ ,  $cd$ ,  $de$ ,  $ef$ ,  $fa$  (для шестифазной обмотки) — представляют собой суммарные эдс, действующие между зажимами обмотки. Как видно из чертежей, эти эдс представляют собою геометрические суммы эдс отдельных проводников. Отсюда ясно, что обмотка использована тем лучше, чем больше число фаз. Мерой этого использования, как уже указывалось выше, является обмоточный коэффициент, равный отношению суммарной эдс к алгебраической сумме эдс отдельных проводников (или равный отношению хорды к охватываемой ею дуге), т. е. величина

$$k_w = \frac{2 \sin \frac{\pi}{m}}{m} = \frac{m}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}$$

Так, обр. для однофазной обмотки ( $m=2$ )  $k_w=0,637$ , для трехфазной ( $m=3$ )  $k_w=0,836$ , для шестифазной ( $m=6$ )  $k_w=0,955$ . Обмотки постоянного тока могут быть также разрезаны в точках присоединения. Такие разрезные обмотки гл. обр. и применяются. В этом случае отдельные фазы соединяются в звезду. Если обмотку постоянного тока разрезать в шести местах, то мы получим по два отрезка, имеющих одну и ту же фазу, и можем соединить эти отрезки так, чтобы получить трехфазную обмотку. На рис. 40 показана диаграмма такой обмотки, соединенной в звезду. Буквы, обозначающие отдельные отрезки, оставлены те же, что и на рис. 39 (справа). Делается это с целью получения лучшего использования меди, т. к. обмоточный коэффициент имеет здесь такую же величину, как и для шестифазной обмотки. Практически получается экономия в меди почти на 25%. Для роторов асинхронных двигателей могут применяться уже рассмо-

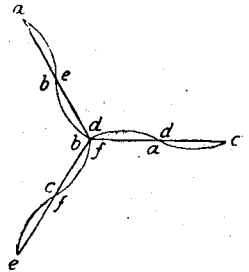


Рис. 40.

тренные нами обмотки: катушечные, стержневые и постоянного тока без коллектора. Однако, чаще всего здесь встречаются двухслойные стержневые обмотки с удлинением или укорочением перехода. В этом случае в каждой впадине находятся два стержня, уложенных один над другим, подобно тому, как в обмотках постоянного тока. Число впадин ротора  $u = 2p m q$ , где  $2p$  — число полюсов,  $m$  — число фаз и  $q$  — число впадин на полюс и фазу. Отметим, что в подавляющем большинстве случаев число фаз ротора  $m = 3$ . Очень редко встречаются двухфазные роторы, однофазные же не применяются совершенно, так как не позволяют получить устойчивое число оборотов. Так же, как и в обмотках постоянного тока, в данном случае два соседних соединенных между собою проводника (находящихся на расстоянии одного шага) расположены, как правило, в различных слоях, т.е., если один лежит в верхней части впадины, то другой находится в нижнем слое. Если исходить из какого-либо лежащего в верхнем слое проводника, который мы (совершенно произвольно) обозначим через  $1_B$ , то, чтобы перейти к следующему проводнику, нужно сдвинуться вдоль окружности ротора на некоторое число впадин. Это число называется шагом обмотки. Для рассматриваемых обмоток первый частичный шаг берут равным полюсному делению, т.е.  $y_1 = \frac{u}{2p} = m q$ , что для трехфазных обмоток дает  $y_1 = 3q$ . Так обр., проводник  $1_B$  должен быть соединен с проводником  $(3q + 1)_B$ , где значек „н“ обозначает, что этот проводник лежит в нижнем слое. Второй частичный шаг берут равным первому, т.е.  $y_2 = y_1 = 3q$  (заметьте, что эти обмотки выполняются в виде волновых). Тогда проводник  $(3q + 1)_B$  соединяют с  $[(3q + 1) + 3q]_B = (6q + 1)_B$ . Если обойти шагами такой величины вдоль всей окружности ротора, то мы увидим, что мы вернулись снова к проводнику  $1_B$ , т.е. обмотка замкнется, несмотря на то, что еще не все проводники использованы. Поэтому при обходе ротора последний шаг делают на единицу больше или меньше, т.е. берут его рав-

ным  $3q \pm 1$ . В первом случае (+) получается обмотка с удлинением, а во втором случае (-) с укорочением перехода. Рассмотрим на примере первый случай. Предположим, что  $2p = 4$ ;  $q = 4$ ;  $m = 3$ ;  $u = 2p q m = 4 \cdot 4 \cdot 3 = 48$ ;  $y_1 = y_2 = 3q = 12$ . От проводника  $1_B$  идем к  $1 + 12 = 13_B$ , затем к  $13 + 12 = 25_B$  и к  $25 + 12 = 37_B$ . Если бы следующий шаг был опять взят равным 12, то мы пришли бы к проводнику  $37 + 12 = 49_B$ , т.е. к  $1_B$  и замкнули бы обмотку. Поэтому последний шаг берем равным  $12 + 1 = 13$  и переходим к проводнику  $37 + 13 = 50_B = 2_B$ . Продолжая дальше, получим следующую таблицу:

$1_B$	—	$13_B$	—	$25_B$	—	$37_B$	—	$2_B$
$2_B$	—	$14_B$	—	$26_B$	—	$38_B$	—	$3_B$
$3_B$	—	$15_B$	—	$27_B$	—	$39_B$	—	$4_B$
$4_B$	—	$16_B$	—	$28_B$	—	$40_B$	—	

Если бы теперь мы захотели продолжить обмотку таким же образом, то мы пришли бы к проводнику  $40 + 13 = 53 = 5_B$ , но этот проводник принадлежит уже к другой фазе, а вместе с тем мы обошли только половину проводников данной фазы. Для того, чтобы включить в обмотку и остальные провода, после  $q$  обходов (в данном случае 4) делают так наз. поворотное соединение, которое в виде исключения соединяет два нижних проводника, расстояние между которыми берется равным нормальному шагу, т.е.  $3q$ . После этого шагание идет в обратном направлении. Тогда обмотка нашего примера продолжится следующим образом:

				$40_B$	—	$4_B$		
$4_B$	—	$40_B$	—	$28_B$	—	$16_B$	—	$3_B$
$3_B$	—	$39_B$	—	$27_B$	—	$15_B$	—	$2_B$
$2_B$	—	$38_B$	—	$26_B$	—	$14_B$	—	$1_B$
$1_B$	—	$37_B$	—	$25_B$	—	$13_B$	—	

Схема этой обмотки (неполная) показана на рис. 41, причем для наглядности верхние провода показаны сплошной линией, а нижние пунктиром. Так обр., наиболее важными пунктами обмотки являются: начало  $1_B$ , конец  $13_B$  и поворот-

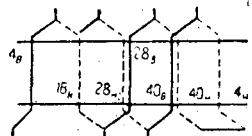


Рис. 41.

ное соединение  $40_n - 4_n$ . Точно так же выполняются и другие фазы обмотки. Из других обмоток для роторов асинхронных двигателей укажем еще на короткозамкнутые обмотки, в виде „беличьего колеса“. Здесь во впадины ротора закладывается ряд медных (иногда алюминиевых) стержней, соединяемых по торцам массивными кольцами, как показано на рис. 42.

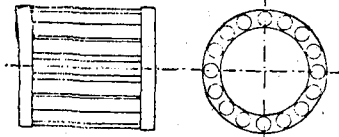


Рис. 42.

Для некоторых машин применяются комбинированные обмотки, представляющие собой либо совокупность двух отдельных обмоток различного типа (некоторые коллекторные двигатели), либо одну единственную обмотку, снабженную одновременно и коллектором и кольцами (одноякорные преобразователи, некоторые коллекторные машины переменного тока).

Как уже неоднократно упоминалось, в современных машинах обмоточные проводники укладываются во впадины, выштампованные в листах, составляющих статор или ротор. Провода или стержни, из которых изготавливается обмотка, изолируются обычно путем обматывания хлопчатобумажной пряжей (в 2—3 слоя). Впадины бывают трех типов: открытые, закрытые и полузакрытые. Открытые впадины применяются чаще всего для машин постоянного тока (рис. 43) и удобны тем, что допускают предварительное изготовление обмотки на станоне, благодаря чему изоляция становится надежнее и уменьшается стоимость изготовления. Недостатком всех впадин (особенно важным для машин переменного тока) является неравномерное распределение силовых линий в воздушном промежутке. Совершенно закрытые впадины хотя и дают вполне равномерное распределение силовых линий, зато весьма увеличивают рассеяние и затрудняют изготовление обмоток. Применяются почти исключительно для роторов в виде

беличьего колеса в асинхронных двигателях. Для машин переменного тока наиболее часто применяются впадины полузакрытого типа (рис. 44). Здесь, благодаря наличию зазора между зубцами, рассеяние будет практически таким же, как и у открытых впадин, а с другой стороны, в виду того что ширина зазора не превышает обычно 5 мм, распределение силовых линий в воздушном промежутке будет почти равномерным. Что касается изолирования проводников от стенок впадины, то при небольших напряжениях впадина обычно выкладывается лишь тонким слоем особого картона (прешспана), так как качество изоляции здесь определяется скорее механическими, чем электрическими условиями. После за-

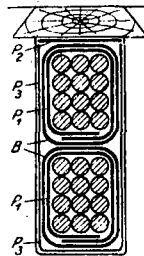


Рис. 43.

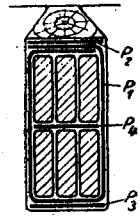


Рис. 44.

кладки обмотки она зажимается загоняемым сбоку деревянным или фибровым клином. При более высоких напряжениях секции обматывают дополнительно прешспаном или льняной лентой. На дно впадины и под клин кладут прешспановые полоски. На рис. 43 и 44 буквами  $P_1, P_2, P_3$  обозначен прешспан, а буквой  $B$  — льняная лента. Иначе обстоит дело с обмотками машин переменного тока высокого напряжения. Здесь изоляция впадины является наиболее ответственным местом всей конструкции и ей уделяется самое серьезное внимание. В таких машинах изоляция впадины состоит обычно из сплошной трубки, изготовленной из миканита или слюды. Проводники закладываются сбоку в трубку и затем трубка под давлением заполняется особой изолирующей массой, чтобы удалить воздух и создать более прочную, монолитную изоляцию. Так же тщательно изолируются в машинах

высокого напряжения и лобовые соединения обмоток.

*Магнитная цепь Э. м.* Совокупность всех частей машины, через которые проходит магнитный поток, называется

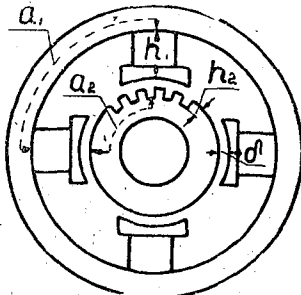


Рис. 45.

магнитной цепью, или магнитопроводом. Для вращающихся машин различают три вида магнитопроводов: с неподвижными выступающими полюсами, рис. 45 (машины постоянного

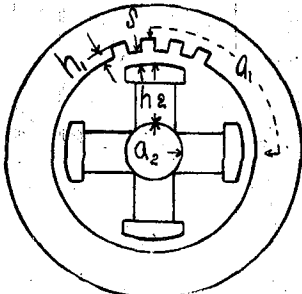


Рис. 46.

тока и некоторые коллекторные машины). с вращающимися выступающими полюсами рис. 46 (обычные синхронные машины) и с неясно выраженными

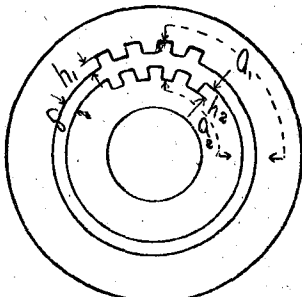


Рис. 47.

полюсами, рис. 47 (турбогенераторы, асинхронные машины и некоторые

коллекторные машины). Магнитопроводы, показанные на рис. 45 и 46, имеют неравномерный воздушный промежуток, который, как и магнитное сопротивление, будет здесь наименьшим под полюсами. Принципиального различия между магнитопроводами по рис. 45 и 46 нет, лишь в первом случае полюса помещаются на статоре, а во втором — на роторе. Магнитную цепь по рис. 45 часто называют цепью с внутренним якорем, а по рис. 46 — с внешним якорем. На рис. 47 магнитопровод имеет повсюду одинаковый воздушный промежуток (если не учитывать влияния впадин и зубцов), а, следовательно, и одинаковое по всей окружности магнитное сопротивление. Для того, чтобы провести магнитный поток через какую-либо часть магнитопровода машины, необходимо затратить определенную энергию, величина которой может иметь чрезвычайно разнообразные значения в зависимости от материала, из которого состоит данная часть магнитной цепи, и длины пути прохождения потока. Величина потока, приходящаяся на  $1 \text{ см}^2$  поперечного сечения (т.-е. сечения, перпендикулярного к направлению силовых линий), носит название магнитной индукции (см. *теоретические основы электротехники*) и выражается фор-

мулой  $B = \frac{\Phi}{Q}$  гаусс, где  $\Phi$  — поток в максвеллах, а  $Q$  — поперечное сечение в  $\text{см}^2$ . Так, обр., при одной и той же энергии мы получаем в зависимости от сорта материала различные индукции, в то время как напряженность поля от материала не зависит. Между напряженностью поля  $H$  и магнитной индукцией  $B$  существует зависимость  $B = \mu H$ , где  $\mu$  — магнитная проницаемость. След.,  $B$  тем больше, чем выше магнитная проницаемость материала. Для воздуха  $\mu = 1$ , и поэтому здесь  $B = H$ . Очевидно, с точки зрения экономичности выгодно при затрате определенного количества энергии иметь возможно большую индукцию, т.-е. возможно больший магнитный поток. Так как наибольшей магнитной проницаемостью обладает железо и его модификации (чугун и сталь), то магнитопроводы Э. м. изготавливают всегда из

этих матерьялов. При этом во вращающихся Э. м. в качестве прослойки между неподвижной (статор) и вращающейся (ротор) частями приходится оставлять тонкий слой воздуха (воздушный промежуток, или междужелезное пространство) и затрачивать большую часть энергии возбуждения на проведение через него магнитного потока. С этим обстоятельством приходится мириться в силу невозможности без него обойтись. Так как даже для определенного сорта железа магнитная проницаемость не является величиной постоянной и изменяется в широких пределах в зависимости от величины напряженности поля  $H$ , то и величина индукции  $B$  не остается пропорциональной  $H$ . При малых  $H$ , вследствие быстрого увеличения  $\mu$  индукция  $B$  так же увеличивается очень быстро. Затем в некоторых пределах значений  $H$  магнитная проницаемость остается постоянной, и индукция  $B$  растет пропорционально  $H$ . Наконец, наступает т. наз. насыщение железа, проницаемость начинает уменьшаться, увеличение  $B$  замедляется, и вскоре дальнейшее увеличение  $H$  уже не в состоянии сколько-нибудь значительно повысить  $B$ . Так как напряженность поля  $H$  обуславливает собой намагничивание магнитопровода, то ее часто называют еще намагничивающей силой. В практических расчетах пользоваться величиной  $H$  неудобно и поэтому здесь берут пропорциональную ей величину  $aw = 0,8 H$ , где  $aw$  — число ампер-витков на 1 см пути. Физическое значение величины  $aw$  выясняется из следующих соображений. Если имеется соленоид, состоящий из  $w$  витков, по которым проходит ток  $i$  ампер, то возбуждаемый этим соленоидом поток будет определяться произведением  $i$  ампер-витков, т. е. поток будет увеличиваться как при возрастании тока, так и при увеличении числа витков. Для того, чтобы в данном участке магнитопровода установить некоторый поток, потребуется известное число ампер-витков. Так как магнитное сопротивление пропорционально длине, то чем больше протяжение магнитопровода, тем большее потребуется число ампер-витков. То количество ампер-

витков, которое требуется для установления данного потока в данном магнитопроводе при его длине в 1 см и будет величиной  $aw$ . Если длина пути составляет  $l$  см, то  $aw = \frac{ilw}{l}$ . Из формулы  $B = \mu H$  следует, что для установления данной индукции  $B$  потребуется тем меньшая намагничивающая сила или тем меньшее число ампер-витков на см  $aw$ , чем больше магнитная проницаемость матерьяла. Соотношения между  $B$  и  $aw$  даются обычно в виде кривых, показанных на рис. 48 для различных сортов железа (см. также *электротехнические матерьялы*). Т. к. во вращающихся частях машины все время происходит перемагничивание железа и возникают сопутствующие ему потери, то для уменьшения потерь те части магнитопровода, которые подвергаются перемагничиванию, изготавливаются из тонких (обычно 0,5 мм) листов, изолированных друг от друга проклейкой бумаги толщиной около 0,05 мм. Листы собираются в пакеты так, чтобы плоскости раздела были параллельны направлению магнитного потока. Литая сталь и чугун применяются (чугун в последнее время очень редко) лишь для тех частей магнитопровода, где перемагничивание не имеет места (индукторы машин постоянного тока и синхронных). Для трансформаторов применяют листовое железо обычно толщиной 0,35 мм, чтобы еще больше понизить потери на перемагничивание. В малых машинах и трансформаторах оклейку листов бумагой часто заменяют покрытием тонким слоем особого изолирующего лака.

Как уже установлено выше, для получения в данном магнитопроводе данного магнитного потока необходимо определенное число ампер-витков. Если магнитопровод имеет длину  $l$  см, состоит из однородного матерьяла и имеет всюду одинаковое поперечное сечение, то это число ампер-витков будет выражаться формулой  $AW = awl$ , где  $aw$  — число ампер-витков на 1 см длины. Если, как это всегда бывает на практике, магнитопровод состоит из нескольких частей, изготовленных из различного матерьяла и имеющих

различное сечение, то величина  $aw$  для всех этих частей не будет одинаковой, и в этом случае приходится разбивать цепь на отдельные участки, подсчитывать ампер-витки для каждого участка отдельно и затем их суммировать. Тогда

$AW = aw_1 l_1 + aw_2 l_2 + aw_3 l_3 + \dots = \sum aw l$ . Величина  $AW$  является как бы источником магнитного потока и носит название *магнитодвижущей силы* (сокращенно мдс). Так как величина мдс зависит только от числа

жутка, либо вследствие того, что сам воздушный промежуток будет не вполне равномерным, т.е. его магнитное сопротивление не будет во всех точках одинаково.

Рассмотрим сперва возбуждение мдс *однофазным переменным током*, при чем первоначально — для случая магнитопровода, показанного на рис. 47, т.е. для магнитопровода с равномерным воздушным промежутом. Далее предположим, что наша обмотка имеет число впадин на полюс и фазу  $q = 1$ ,

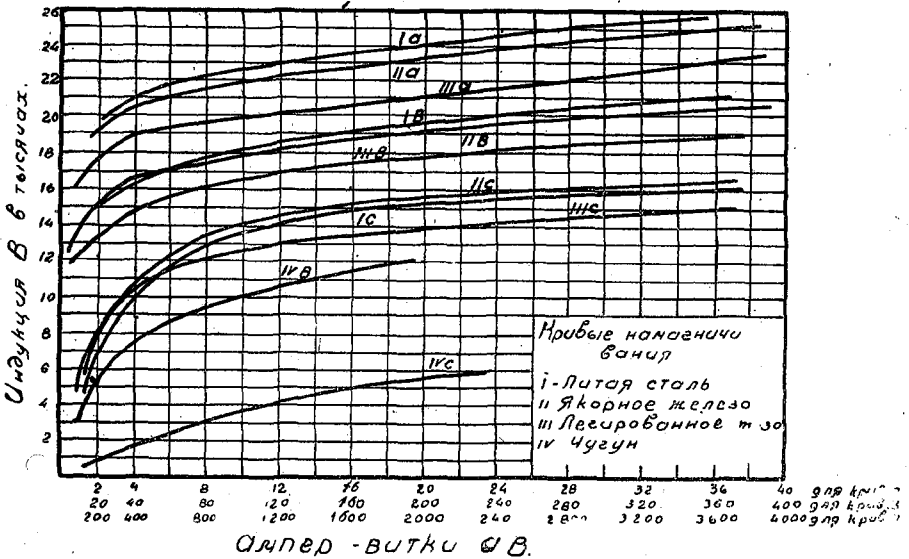


Рис. 48.

витков и силы тока, то при постоянном числе витков мдс будет зависеть всецело от тока. Если ток постоянный, то и мдс будет иметь постоянную величину; если ток переменный, то и мдс будет изменяться с тем же числом периодов, т.е. будет колебаться от некоторого положительного максимума до такого же по абсолютной величине отрицательного максимума. Мдс создает магнитный поток, проходящий из статора в ротор или из ротора в статор через воздушный промежуток машины. При этом в большинстве случаев магнитная индукция не будет во всех точках этого воздушного промежутка одинаковой либо вследствие того, что мдс не будет распределена равномерно вдоль воздушного проме-

жутка, либо вследствие того, что сам воздушный промежуток будет не вполне равномерным, т.е. его магнитное сопротивление не будет во всех точках одинаково.

как показано на рис. 49. Здесь имеется ряд катушек, ширина которых равна полюсному делению  $\tau$ . Если по этим катушкам проходит электрический ток, то возникает мдс, возбуждающая магнитный поток, пронизывающий катушку и замыкающийся через два воздушных промежутка, как показано на рис. 49 тонкими линиями со стрелками.

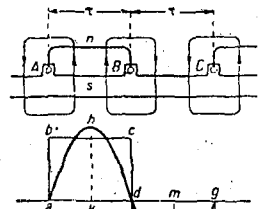


Рис. 49.

Такая катушка представляет собой не что иное, как соленоид, и обладает, сле-

довательно, двумя магнитными полюсами: северным ( $n$ ) и южным ( $s$ ). Так как величина мдс определяется произведением из силы тока на число витков и так как внутри катушки никаких источников магнетизма не имеется, то во всех точках внутри катушки, т.-е. на всем протяжении полюсного деления, мдс будет одинаковой и графически изображится в виде четырехугольника  $abcd$ . На протяжении соседнего полюсного деления (на участке  $BC$ ) мдс также будет во всех точках иметь одинаковую величину, равную предыдущей, но направлена она будет в противоположную сторону. Поэтому четырехугольник  $defg$ , характеризующий закон изменения мдс на участке  $BC$ , построен ниже линии  $ag$ . Высота прямоугольника  $ab$  или  $de$  равна половине мдс всей катушки, т. е. на участках  $ad$  или  $dg$  поток проходит только через один воздушный промежуток. Так как в рассматриваемом случае воздушный промежуток равномерный, то и поток также будет распределен равномерно, т.-е. индукция будет везде иметь одинаковую величину, а направление ее будет соответствовать направлению мдс. Другими словами, закон изменения индукции будет характеризоваться той же ломаной линией  $abcdefg$ , но в другом масштабе. Т. к. мдс вызывается здесь переменным током, то и сама она будет изменяться во времени с тем же числом периодов  $f$ . Если мгновенное значение циркулирующего в катушке переменного тока будет  $i = \sqrt{2}l \sin \omega t$ , где  $l$  — эффективное значение тока (см. *теоретические основы электротехники*), то мгновенное значение мдс будет

$$AW = \frac{1}{2} \sqrt{2} l w \sin \omega t,$$

где  $w$  — число витков катушки. В технике переменных токов все расчеты значительно упрощаются, если изменение тех или иных величин происходит по синусоиде. Раскладывая нашу прямоугольную кривую на ряд синусоид (см. *теоретические основы электротехники*), мы берем только основную гармонику и пренебрегаем влиянием других. Эта основная гармоника показана на рис. 49, при чем ее ампли-

туда, т.-е. высота  $kh$  или  $lm$  будет в  $\frac{4}{\pi}$  ( $\approx 1,27$ ) раза больше высоты прямоугольника  $ab$  или  $fg$ . Тогда мгновенное значение основной синусоиды мдс выразится равенством

$$(AW)_1 = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{2} \sqrt{2} l w \sin \omega t = 0,9 l w \sin \omega t,$$

а ее амплитуда

$$(AW)_{1m} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{2} \sqrt{2} l w = 0,9 l w.$$

Рассмотрим теперь случай, изображенный на рис. 50, когда на полюс приходится несколько впадин ( $q > 1$ ). Здесь, внутри катушки мдс также будет постоянной (на участке  $bc$  она будет равна  $bn$ ). Когда же мы начнем двигаться от точки  $b$  влево или от точки  $c$  вправо, то мы увидим, что мдс начнет постепенно уменьшаться вследствие

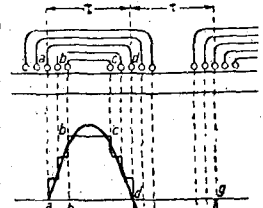


Рис. 50.

уменьшения числа витков и в точке  $a$  мдс станет равной нулю. Другими словами, изменение мдс в этом случае будет уже происходить не по закону прямоугольника, а по закону ломаной линии, при чем между отдельными впадинами мдс будет оставаться постоянной (ступеньки на рис. 50). И в этом случае можно заменить ломаную  $abcdefg$  основной синусоидой, при чем, как видно из чертежа, здесь такая замена приводит к меньшим ошибкам, чем в предыдущем случае, так как здесь закон изменения мдс гораздо ближе к синусоидальному.

Если магнитопровод устроен по схеме рис. 45 или 46, то на закон изменения мдс это не влияет, т. к. из предыдущего ясно, что характер кривой мдс зависит исключительно от расположения обмотки. Что же касается закона распределения магнитной индукции, то здесь он уже будет отличаться от закона распределения мдс, т. к. магнитное сопротивление здесь изменяется вдоль воздушного промежутка.

При возбуждении многофазным переменным током мдс создается в ре-

зультате совместного действия отдельных, сдвинутых в пространстве, фазных обмоток, обтекаемых сдвинутыми во времени фазными токами. При этом, как известно (см. *теоретические основы электротехники*), получается вращающееся магнитное поле, имеющее постоянную величину и перемещающееся в пространстве с синхронной скоростью, т.е. совершающее в минуту  $n = \frac{60f}{p}$  оборотов, где  $f$  — частота тока, а  $p$  — число пар полюсов машины. При обычно встречающемся числе впадин на полюс и фазу  $q = 3 \dots 4$ , распределение результирующей мдс в пространстве можно практически считать синусоидальным, при чем амплитуда мдс для трехфазного тока в  $\frac{3}{2}$  раза больше амплитуды мдс каждой фазы, т.е. равна

$$AW = \frac{3}{2} AW^1 = 1,35 Iw.$$

Возбужденный этой мдс поток также будет вращаться в пространстве в отличие от пульсирующего во времени и неподвижного в пространстве потока однофазной обмотки. Можно, однако, всякую пульсирующую во времени и неподвижную в пространстве величину привести к двум вращающимся в противоположные стороны величинам, неизменным во времени. На рис. 51

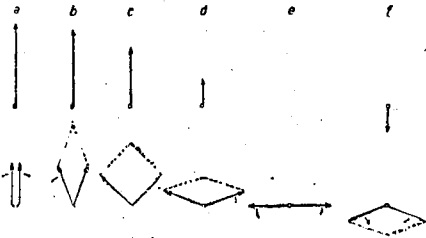


Рис. 51.

вверху представлена (а) мдс однофазной обмотки в тот момент, в который она достигает наибольшей величины. Эту мдс можно представить состоящей из двух одинаковых по величине мдс, равных каждой половине действительной и направленных в одну и ту же сторону. Если обе эти составляющие вращаются в разные стороны с одинаковой (синхронной) скоростью, то через некоторый промежуток вре-

мени они займут положение б и, суммируя их геометрически, мы получим мдс, показанную на чертеже над ними, величина которой уже будет меньше, чем в случае а. При дальнейшем вращении составляющих результирующая мдс (с и д) будет уменьшаться еще больше, пока не наступит момент е, когда результирующая мдс станет равной нулю, т.к. в этот момент составляющие направлены друг против друга и взаимно уничтожаются. В положении ф результирующая мдс будет направлена уже в другую сторону; далее она снова начнет увеличиваться в этом направлении, дойдет до максимума, снова станет уменьшаться, перейдет через нуль и т.д. В машинах переменного тока одну из этих составляющих обычно удается уничтожить или, по крайней мере, настолько ослабить, что ее влиянием можно пренебречь. Тогда и здесь получается вращающееся поле, но имеющее амплитуду в 2 раза меньшую, т.е.

$$AW = \frac{1}{2} 0,9 Iw = 0,45 Iw.$$

Если через обмотку пропускается постоянный ток, то мдс и магнитный поток также будут постоянными и во времени и в пространстве. Рассмотрим сперва магнитопровод типа рис. 47. Одна из форм такой обмотки показана на рис. 52. Здесь все впадины на протяжении всего полюсного деления заполнены обмоткой. Мдс будет иметь наибольшую величину в середине полюсного деления, т.к. здесь число ампер-витков будет наибольшим. В точках а и б мдс будет равна нулю.

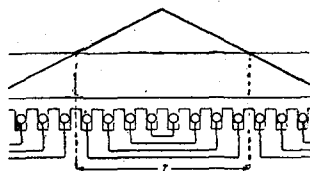


Рис. 52.

Следовательно, мдс распределена здесь по закону треугольника, сильно отличающемуся от закона синусоиды, что совершенно недопустимо. Исходя из этого, в современных машинах обычно заполняются не все впадины на протяжении полюсного деления, а



лишь часть их (обычно  $\frac{2}{3}$ ) и притом так, что в середине полюсного деления обмотки нет (рис. 53). При таком расположении мдс в средней части полюсного деления будет постоянной, и распределение мдс будет иметь форму

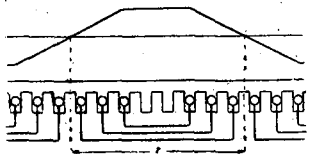


Рис. 53.

трапеции. Если обмоткой заполнено  $\frac{2}{3}$  всех впадин, то закон распределения практически мало отличается от синусоиды. В некоторых случаях обмоткой заполняются все впадины, но число проводников в них берется неодинаковым, а именно: по середине меньше, а по краям больше. Такая конструкция, хотя и сильно удорожает изготовление машины, но зато форма поля получается при ней чисто синусоидальной. В случае магнитопроводов типа рис. 45 или 46 обмотка укладывается вокруг выступающих полюсов, как показано на рис. 54. Здесь уже

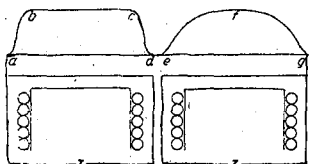


Рис. 54.

величина воздушного промежутка не будет одинаковой на всем протяжении полюсного деления. Если поверхность полюса, обращенная к воздушному промежутку, обточена так, что воздушный промежуток под полюсом везде одинаков (машины постоянного тока), то кривая распределения магнитного потока (и магнитной индукции) представляет собой прямоугольник  $abcd$  (рис. 54 слева). Для того, чтобы приблизиться к синусоиде (необходимо для машин переменного тока), поверхность полюса обтачивают эксцентрично так, чтобы воздушный промежуток под краями полюса был больше, чем под

его серединой. Тогда распределение поля и индукции будет происходить по некоторой кривой  $efg$  (рис. 54 справа), которую путем придания полюсу определенного эксцентриситета можно значительно приблизить к синусоиде.

Для подсчета мдс машины, т. е. полного числа ампер-витков, необходимого для получения заданной эдс можно воспользоваться найденным выше уравнением  $E = 4 k_f \cdot k_w \cdot fw \cdot \Phi \cdot 10^{-8}$ .

Величина  $A = k_f k_w fw 10^{-8}$  для данной машины является постоянной, и тогда  $E = A \Phi$ , т. е. для данной машины эдс зависит исключительно от величины магнитного потока, и ее форма будет тождественна с формой этого потока. Зная величину потока, геометрические размеры магнитопровода (длину и поперечное сечение), можно подсчитать индукции в различных частях магнитной цепи, а зная материал, из которого они сделаны, можно подсчитать по кривой рис. 48 ампер-витки на  $см$  длины ( $aw$ ). После этого подсчитываются ампер-витки для каждого участка магнитопровода и суммируются. Обычно из всего числа ампер-витков, необходимых для создания данного магнитного потока, большая часть тратится на преодоление магнитного сопротивления воздушного промежутка. Если каким-либо образом начать уменьшать или увеличивать мдс (проще всего уменьшать или увеличивать для этого проходящий через обмотку ток), то магнитный поток  $\Phi$  и пропорциональная ему эдс также начнут уменьшаться или увеличиваться. Если задаться несколькими значениями потока и просчитать для них по указанному выше способу мдс, то можно построить очень важную кривую зависимости между ними, т. наз. характеристику намагничивания машины. Для этого откладываем в некотором масштабе (рис. 55) по вертикальной линии от некоторой точки  $O$  эдс  $oa, ob, oc, \dots$ , а по горизонтальной линии, также от точки  $O$ , соответствующие им мдс  $om, on, oq, \dots$ . Если теперь через точки  $a, b, c, \dots$  провести горизонтали до встречи с вертикалями, проведенными из соответствующих точек  $m, n, q, \dots$ , и полученные точки

пересечения  $x, y, z, \dots$  соединить плавной кривой, то мы и получим характеристику намагничивания машины  $oxuz, \dots$ . При малых эдс, т. е. при малых потоках, индукция настолько

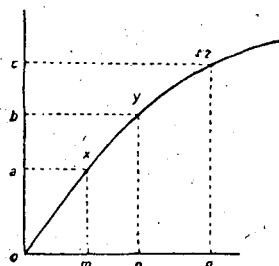


Рис. 55.

мала и магнитная проницаемость железа настолько велика, что магнитное сопротивление обусловлено исключительно воздушным промежутком, а т. к. для воздуха мдс пропорциональна потоку, то их характеристика намагничивания будет здесь прямой линией. Однако, при дальнейшем увеличении  $\Phi$  и  $E$  магнитная проницаемость падает, магнитное сопротивление железа возрастает, и поток начинает увеличиваться медленнее, чем мдс: кривая загибается книзу. При еще большем увеличении  $\Phi$  и  $E$  насыщение железа увеличивается еще больше и, наконец, наступает такое состояние, когда даже значительное увеличение мдс не вызывает заметного роста  $\Phi$  и  $E$ . Зная, на какой точке кривой лежит нормальная эдс машины, можно судить о степени ее насыщения. Насыщение не должно быть слишком малым, т. к. тогда малейшее изменение мдс (например, вследствие изменения сопротивления обмотки от нагревания) вызывало бы значительные колебания эдс, что совершенно недопустимо. С другой стороны, слишком большое насыщение хотя и дает устойчивую эдс, но увеличивает мдс и удорожает изготовление машины. Обычно нормальная эдс лежит на перегибе кривой (примерно, между точками  $y$  и  $z$  рис. 55). Характеристика намагничивания машины является весьма ценной и при испытании машин, т. к. с ее помощью можно найти ряд зависимостей между различными величинами, определяющими работу машин.

*Коэффициент полезного действия* (кпд). Идеальным случаем работы Э. м. (как и всякой машины вообще) был бы такой, при котором вся подводимая энергия целиком могла бы быть получена от машины в другой форме. Однако, как бы ни совершенствовалась конструкция машин, какие бы материалы для них не применялись, этот случай на практике осуществлен быть не может. Прохождение тока по проводнику, согласно закону Джоуля, связано с выделением тепла за счет части пропускаемой через проводник энергии. Перемагничивание железа также связано с выделением теплоты. Наконец, трение в подшипниках и сопротивление вращению со стороны окружающего воздуха также требуют для своего преодоления некоторого расхода энергии. Все эти потери, превращаясь в теплоту и рассеиваясь в окружающем пространстве, требуют затраты известного количества работы, доставляемого первичным источником энергии (для генератора — первичным двигателем, для двигателя — питающей его сетью) и являющегося безвозвратно потерянным; другими словами, энергия, получаемая машиной, всегда больше, чем отдаваемая. Если обозначить мощность, подводимую к машине, через  $P_a$ , а мощность, отдаваемую ею — через  $P$ , то отношение

$$\eta = \frac{P}{P_a}$$

всегда меньше единицы и называется коэффициентом полезного действия. Так как полная мощность  $P_a$  состоит из полезной мощности  $P$  и потерь  $W$ , то кпд может быть также выражен в форме

$$\eta = \frac{P}{P + W} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{P_a - W}{P_a}$$

Для удобства изучения все потери в машине можно разбить на три группы: потери в меди, потери в железе и потери на трение (или механические). Очевидно, что в трансформаторах последняя группа потерь не имеет места. *Потери в меди*, т. е. в проводниках обмоток, прежде всего обусловлены прохождением тока. По закону Джоуля, эта, т. наз. омическая, потеря составляет  $W_m = I^2 R$ , где  $I$  — сила тока, иду-

щего через проводник, имеющий омическое сопротивление  $R$  ом. Эти потери имеют место как в рабочих обмотках (например, якорь машины постоянного тока, статор синхронной машины и т. д.), так и в обмотках, создающих магнитное поле машин (обмотках возбуждения). К этим же потерям могут быть отнесены потери, обусловленные прохождением тока через контакт между щетками и контактными кольцами или коллектором. Кроме этой потери, в проводниках обмоток благодаря потокам, охватывающим их и пересекающим их своими силовыми линиями, индуктируются т. н. вихревые токи, или токи Фуко (см. *теоретические основы электротехники*), замыкающиеся в виде вихрей внутри проводника и обуславливающие, особенно в массивных проводниках, значительные потери, называемые добавочными потерями в меди. Величина этих добавочных потерь точному учету не поддается, в виду влияния целого ряда обстоятельств, предусмотреть которые очень трудно. К потерям в меди можно также отнести потери в реостатах, регулирующих силу тока возбуждения в машинах. *Потери в железе* обусловлены переменным перемагничиванием магнитопровода в целом или его отдельных частей. Прежде всего здесь следует отметить потерю, затрачиваемую на работу перемагничивания, или потерю на гистерезис. При тех больших индукциях, которые встречаются в магнитопроводах современных машин, эта потеря оказывается пропорциональной: частоте перемагничивания  $f$  (числу полных перемагничиваний в секунду), квадрату индукции  $B$ , объему перемагничиваемого железа  $V$ , толщине железных листов, из которых составлен магнитопровод  $a$ , и может быть выражена формулой  $W_h = A_h f B^2 V \cdot a$ , где  $A_h$  — коэффициент, зависящий от сорта железа. Кроме потерь на гистерезис, в железе имеют еще место *потери на токи Фуко* (от индуктируемых в нем переменным потоком вихревых токов, или токов Фуко), зависящие от квадрата частоты перемагничивания, квадрата индукции, объема железа, квадрата толщины железа и сорта

железа. Эта потеря может быть выражена формулой  $W_f = A_f f^2 B^2 V a^2$ , где  $A_f$  — снова коэффициент, зависящий от сорта железа. Далее, в железе появляется еще потеря на вихревые токи, вызываемые колебаниями магнитной индукции в слоях, лежащих у воздушного промежутка, вследствие наличия на статоре или роторе (или и на том и на другом) зубцов и впадин. Т. к. индуктируемые здесь токи не проникают в толщу железа, а располагаются на поверхности, то и самая потеря называется поверхностной. К потерям в железе относятся также пульсационные потери, вызываемые колебаниями индукции в зубцах статора и ротора, а также добавочные потери, обусловленные местными короткими замыканиями между отдельными листами, появляющимися в результате их механической обработки (штамповки, резки, сверления и т. д.). Несмотря на тщательное изготовление и обильную смазку, *потери, обусловленные трением цапф* в подшипниках, достигают довольно больших величин. Эти потери зависят, с одной стороны, от величины трущейся поверхности, а с другой стороны — от скорости вращения и температуры подшипников. С целью понизить эти потери, небольшие машины часто изготовляют с шариковыми или роликовыми подшипниками. Потеря на сопротивление от воздуха точному учету не поддается. В малых машинах она имеет обычно очень небольшую величину, но зато в больших быстроходных машинах (турбомашин) она может дойти до 2% от общей мощности машины. К потерям на трение можно также отнести мощность, затрачиваемую на вращение вентиляторов, способствующих лучшему охлаждению машины.

Потери в машине не являются во всех случаях постоянными при любой нагрузке машины. Таким постоянством (и то приблизительно) обладают только потери механические. Практически постоянными можно также считать потери в железе, т. к. эдс, создаваемая магнитным потоком, обуславливающим эти потери, при всех на-

грузках машины остается приблизительно постоянной. Потери в меди рабочих обмоток пропорциональны квадрату силы тока и с увеличением нагрузки растут очень быстро. Отсюда следует, что кпд машины также не является величиной постоянной и сильно зависит от нагрузки. На рис. 56 представлена в виде кривой типич-

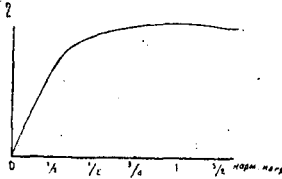


Рис. 56.

ная зависимость между кпд и нагрузкой машины, выраженной в долях от нормальной. Из этой кривой видно, что вначале, когда нагрузка мала, кпд растет очень быстро, т. к. в этой области потери в меди сравнительно невелики. При дальнейшем увеличении нагрузки увеличение кпд замедляется (потери в меди быстро возрастают) и, наконец, при еще большей нагрузке кпд начинает падать, т. к. потери в меди достигают очень большой величины. При отсутствии нагрузки (при холостом ходе) кпд равен нулю, т. к. машина не совершает никакой полезной работы. Обычно машины проектируются так, чтобы наибольшего значения кпд достигал около нормальной нагрузки. Что касается абсолютной величины кпд, то она зависит от типа машины и от ее мощности. Вообще говоря, в Э. м. кпд весьма высок, достигая в наиболее мощных типах машин до 97—98%, а в наиболее мощных трансформаторах до 99—99,5%.

**Нагревание Э. м.** Т. к. потери машины переходят в теплоту, то при работе машина постепенно нагревается, причем повышение температуры происходит до тех пор, пока не установится тепловое равновесие, т. е. машина будет отдавать в окружающую среду столько же тепла, сколько она получает его от происходящих в ней потерь. Для того, чтобы не произошло обугливания и разрушения изоляции обмоток, предельная температура не должна

превосходить определенных значений. установленных электротехническими нормами. В машинах небольшой мощности, где потери невелики, а поверхность, через которую теплота переходит в окружающую среду, относительно велика, это условие выполнить легко, и здесь вполне достаточным является естественное охлаждение машины. Напротив, в машинах большой мощности, где потери по сравнению с величиной машины достигают огромных значений, такого естественного отвода теплоты уже недостаточно и приходится прибегать к искусственному охлаждению с помощью крыльчатого вентилятора сидящего на валу машины, а в особенно трудных случаях (турбомашины) к продуванию холодного воздуха через корпус машины. К таким же мерам приходится прибегать и в случае когда по условиям эксплуатации машина должна быть изготовлена герметически закрытой. Для небольших закрытых двигателей иногда применяют водяное охлаждение, когда вода проходит через особую охлаждающую рубашку, соприкасающуюся с нагретыми частями машины. Для лучшего охлаждения трансформаторов их погружают в баки, наполненные минеральным маслом, а при очень больших мощностях это масло охлаждают, кроме того с помощью погруженного в него змеевика, сквозь который пропускается холодная вода. Вопросы нагревания и охлаждения машин являются в электромашиностроении весьма важными, т. к. нагреванием машины в конечном счете определяется ее мощность. Понытным, поэтому, является стремление возможно больше повысить охлаждаемость машины. В последнее время для этой цели начинают применять водород из-за его легкости (а, след., и меньших потерь на продувание) и лучших, чем у воздуха, способностей отнимать тепло у нагретых частей машины.

**Машины постоянного тока (м. п. т.). Реакция якоря.** До тех пор, пока ток в проводниках, составляющих обмотку якоря м. п. т., ток не проходит (т. е. машина вращается вхолостую), магнитный поток создается исключительно индуктором (полюсами) машины. Этот случай показан на рис. 57 слева. Маг-

нитный поток полюсов, т. наз. основной поток машины, направлен здесь снизу вверх. При вращении якоря, в его обмотке индуктируется эдс, достигающая наибольшей величины в проводниках, расположенных в данный момент времени под полюсами, и равная нулю в проводниках, лежащих на нейтральной линии  $mn$  (т. к. здесь при вращении проводники не пересекают магнитных силовых линий). Из чертежа видно, что нейтральная линия расположена перпендикулярно к оси полюсов. Если теперь прекратить возбуждение полюсов (выключив ток в обмот-

зано на рис. 57 справа. Т. к. силовые линии результирующего потока проходят теперь в ябре под некоторым углом к вертикали и т. к. нейтральная линия должна быть всегда перпендикулярна к направлению силовых линий, то, очевидно, мы будем иметь здесь смещение нейтрали на угол  $\alpha$ . На такой же угол должны быть передвинуты и щетки машины для достижения правильной работы. Новая нейтраль  $m_1n_1$  называется физической в отличие от геометрической нейтрали  $mn$ . Смещение физической нейтрали происходит для генераторов в направ-

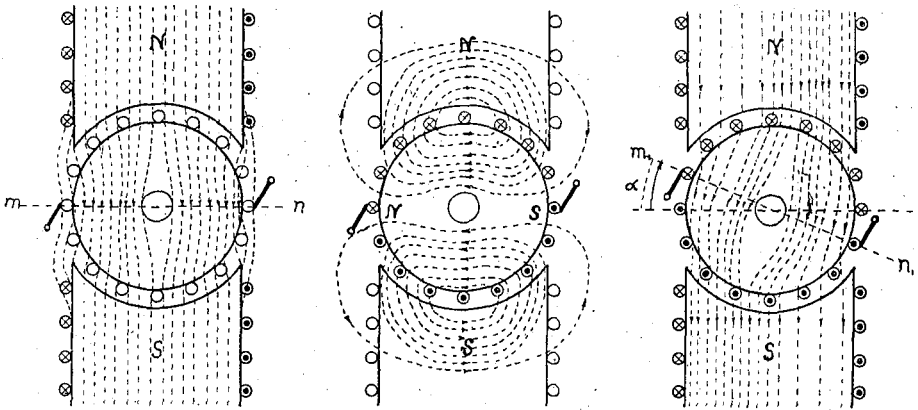


Рис. 57.

ке возбуждения) и питать якорь от стороннего источника постоянного тока, то якорь сам станет электромагнитом, как видно из рис. 57 (средний чертеж), и образует два полюса (северный и южный). Магнитная ось якоря, т. е. линия, проходящая через его полюса, будет направлена по нейтрали машины, т. е. будет совпадать с осью щеток. Очевидно, что при нормальной работе машины, когда возбуждена обмотка полюсов и сам якорь пронизывается током, будут существовать оба потока: основной и поток якоря, иначе называемый потоком реакции якоря. Так как существование двух самостоятельных потоков в одном магнитопроводе невозможно, то оба поля, сложившись, дадут некоторый результирующий поток машины при нагрузке, который, по сравнению с потоком холостого хода, оказывается перекошенным, как пока-

лении вращения якоря, а в двигателях — в сторону, противоположную вращению. Следствием реакции якоря является уменьшение потока машины, а, следовательно, и уменьшение эдс. Уменьшение потока появляется в результате того, что в одной части машины силовые линии сгущаются, а в другой разрежаются, при чем вследствие насыщения железа сгущение не компенсируется разрежением и магнитное сопротивление увеличивается. Для того, чтобы вернуть эдс к ее прежнему значению, приходится увеличивать ток возбуждения. Помимо этого, реакция якоря, вызываемая током самого якоря, увеличивается с возрастанием нагрузки машины. Отсюда ясно, что величина смещения физической нейтрали также зависит от нагрузки, т. е., другими словами, каждой нагрузке машины соответствует одно

определенное правильное положение щеток и при всяком изменении нагрузки щетки должны быть переставляемы. Это создает очень большие неудобства при эксплуатации, и поэтому в современных м. п. т. поле реакции якоря уничтожают с помощью дополнительных полюсов, расположенных в геометрической нейтрали и создающих поток, равный, но противоположный по направлению, потоку реакции якоря. Обмотку возбуждения дополнительных полюсов соединяют последовательно с якорем, и тогда компенсация происходит автоматически при всех нагрузках, т. к. при слабо насыщенных дополнительных полюсах изменение потока будет пропорциональным изменению тока в якоре. Ниже мы увидим, что у дополнительных полюсов есть еще и другая задача—улучшение коммутации машины.

**Коммутация тока.** При вращении якоря все коллекторные пластинки последовательно проходят под щеткой. Т. к. щетки неподвижны, то картина распределения параллельных ветвей в обмотке остается постоянной, т. е. под некоторым полюсом, напр. северным, направления эдс и тока в проводниках остаются всегда одними и теми же. Так. обр., роль щеток сводится к последовательному переключению проводников обмотки из одной ветви якоря в другую. Это переключение, происходящее в момент перехода переключаемого проводника через нейтраль, называется *коммутацией* тока. Процессы, происходящие во время коммутации, чрезвычайно сложны и до сих пор их нельзя еще считать окончательно изученными, несмотря на огромный фактический материал, накопленный многолетними исследованиями. Последовательный ход коммутационного процесса показан на рис. 58, где принято, что обмотка и коллектор перемещаются вправо, щетка неподвижна и ширина щетки равна ширине одной коллекторной пластины. На черт. 1 изображен момент, когда щетка соприкасается еще только с правой пластиной, т. е. момент, предшествующий началу коммутации. Весь ток  $2i_a$ , поступающий из внешней сети, проходит через правую пластину и затем, пройдя через

соединительный проводник и войдя в обмотку, равномерно распределяется в обе стороны (в обе параллельные ветви). Как видно из чертежа, через среднюю секцию (присоединенную к

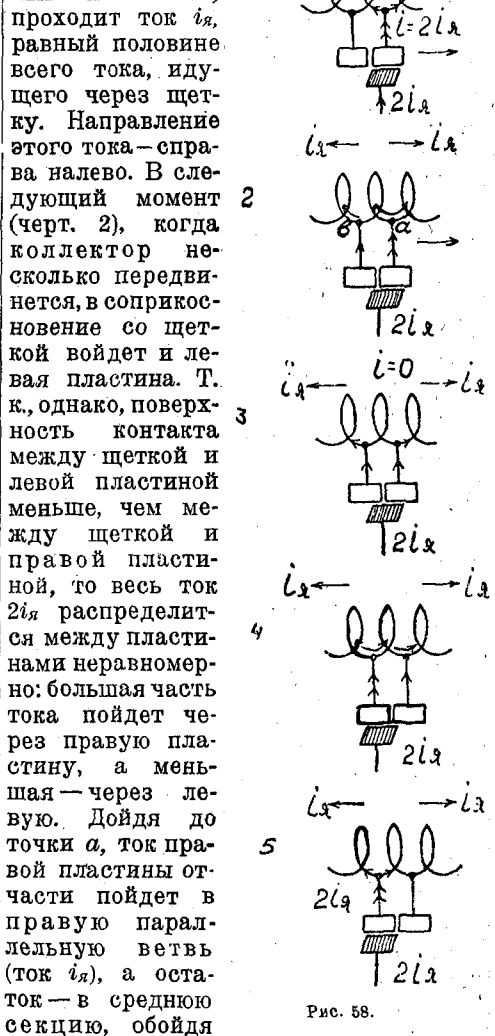


Рис. 58.

которую и соединившись в точке *b* с током левой пластины в ток  $i_a$ , он направится в левую параллельную ветвь. Очевидно, что ток, проходящий в этом случае через среднюю секцию, будет меньше, чем  $i_a$ , т. е. чем в первом случае. На черт. 3 показан следующий момент, когда щетка перекрывает обе

пластины равномерно, т.е. площади контакта между щеткой и каждой из пластин одинаковы. В этом случае через каждую из пластин проходят одинаковые токи  $i_a$ , которые и переходят затем в правую и левую ветви якоря, минуя среднюю секцию (ток в средней секции равен нулю). При дальнейшем перемещении коллектора (чертеж 4), когда площадь контакта между щеткой и левой пластиной становится больше, чем между щеткой и правой пластиной, большая часть тока идет через левую пластину, и, как видно из чертежа, часть этого тока проходит через среднюю секцию в правую параллельную ветвь. Наконец, в момент окончания коммутации (черт. 5) правая пластина выходит из соприкосновения со щеткой, весь ток  $2i_a$  идет через левую пластину, и половина этого тока, т.е.  $i_a$ , поступает через среднюю секцию в правую ветвь якоря. Таким образом, за время (или, как говорят, за период) коммутации ток в средней секции, начиная от нормальной величины  $i_a$ , постепенно уменьшается, переходит через нулевое значение и снова увеличивается, но уже в обратном направлении, до величины  $i_a$ . Если бы процесс коммутации не осложнялся никакими другими явлениями, то описанное изменение тока в коммутируемой секции было бы вполне равномерным, ток изменялся бы по закону прямой линии. Поэтому такую „идеальную“ коммутацию называют прямолинейной. В действительности, однако, явление осложняется тем, что, благодаря изменению тока, в секции возникает эдс самоиндуктивности и взаимной индуктивности (см. *теоретические основы электротехники*), — т. наз. реактивное напряжение коммутации  $e_r$ , — и, кроме того, в общем случае, секция вращается в постороннем магнитном поле (напр., если щетки сдвинуты от нейтрали), которое также создает в ней эдс, т. наз. эдс вращающего поля  $e_k$ . Эдс  $e_r$  и  $e_k$  создают в секции дополнительный ток, накладывающийся на ток прямолинейной коммутации и вызывающий уже неравномерное изменение тока за период коммутации, т.е. прямолинейность коммутации нарушается. Это нарушение усугубляется еще наличием сопро-

тивления самой секции и соединительных проводников, хотя, впрочем, практическое влияние этого обстоятельства в современных машинах ничтожно. Все указанные причины приводят к тому, что переход тока через нуль совершается в коммутируемой секции или раньше середины периода коммутации (ускоренная коммутация), или позже (замедленная коммутация). Искажение коммутации практически приводит к искрению под щетками. Избежать вызванного коммутацией искрения можно двумя путями: увеличивая сопротивление контакта между щетками и тем затрудняя прохождение тока (это достигается применением в современных м. п. т. угольных щеток) или уничтожая самую причину искажения коммутации, т.е. появление эдс  $e_r$  и  $e_k$ . Последнего можно добиться, сдвигая щетки машины в область поля главных полюсов, при чем в такую сторону и на такую величину, чтобы индуцированная в секции этим полем эдс  $e_k$  была равна, а по знаку противоположна, реактивному напряжению  $e_r$ , т.е., чтобы соблюдалось условие  $e_k = -e_r$ . Для этой цели необходимо в генераторах сдвигать щетки за физическую нейтраль в сторону вращения якоря, а в двигателях — против вращения якоря. Так как, однако, величина реактивного напряжения  $e_r$  зависит от силы коммутируемого тока, т.е., иными словами, от нагрузки машины, то величина сдвига щеток при различных нагрузках должна изменяться, что создает большие затруднения в эксплуатации машины. Более радикальным средством для улучшения коммутации являются дополнительные полюса, которые при этом должны быть рассчитаны так, чтобы помимо потока, уничтожающего поле реакции якоря, они создавали бы поток, вызывающий в коммутируемой секции эдс  $e_k = -e_r$ . Тогда нет никакой необходимости сдвигать щетки из геометрической нейтрали, и как реакция якоря, так и реактивное напряжение коммутации будут автоматически компенсироваться при любой нагрузке машины. Распределение полярностей дополнительных полюсов показано на рис. 59. Из чертежа видно

что в генераторах дополнительный полюс должен иметь ту же полярность, что и главный полюс, идущий за ним в направлении вращения якоря, а в двигателе—наоборот. В настоящее время дополнительные полюса являются обязательным элементом каждой м. п. т. за исключением самых малых мощностей,

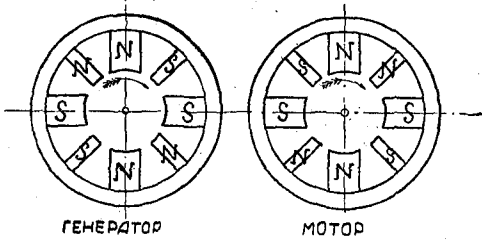
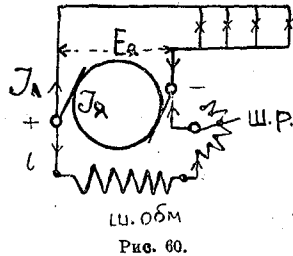
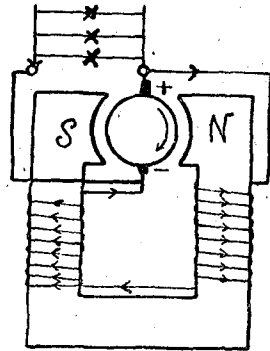


Рис. 59.

т. к. их применение, кроме устранения реакции якоря и улучшения коммутации, дает возможность построить машину с меньшим расходом материала, т. е. экономически более выгодную.—Искрение на коллекторе может вызываться еще и другими причинами помимо указанной выше. Так, напр., благодаря чисто механическим неисправностям (дрожание щеток, плохая притирка щеток и коллектора, истирание коллектора, слабое укрепление токоснимающих частей, неправильная форма коллектора) получается неплотный контакт между щеткой и коллектором, что вызывает появление маленьких вольтовых дуг, в результате чего наступает искрение. Кроме того, искрение может иметь место в том случае, если напряжение между соседними коллекторными пластинами превосходит допустимые пределы (25–30 вольт).

**Способы возбуждения м. п. т.** Для возможности работы м. п. т., как уже указывалось выше, необходимо наличие магнитного потока, пересекающего при вращении якоря проводники его обмотки. Создание этого потока называется возбуждением машины. По способу возбуждения различают м. п. т. с независимым возбуждением и с самовозбуждением, при чем в последнем случае возбуждение может быть последовательным (серием), параллель-

ным (шунт) и смешанным (компаунд). В машинах с независимым возбуждением ток, питающий обмотку полюсов, доставляется посторонним источником энергии, напр. другой машиной или батареей аккумуляторов. Генераторы с независимым возбуждением встречаются очень редко и лишь для специальных целей, нормальные же м. п. т. выполняются всегда с самовозбуждением. На рис. 60, 61 и 62 показаны



схемы генераторов шунт, серием и компаунд. Как видно из рис. 60, в шунтовом генераторе обмотка возбуждения присоединена непосредственно к щеткам машины, т. е. ток в ней устанавливается по лямбда напряжению якоря. Для того, что бы ограничить величину этого тока, обмотку выполняют с большим сопротивлением, а для создания нормального потока, при небольшом значении тока, число витков обмотки возбуждения берут большим. (Как известно, величина потока, создаваемого какой-либо обмоткой, пропорциональна произведению из силы тока на число витков, т. е. числу ампер-витков). Для того, чтобы иметь возможность регулировать величину потока, а, след., и величину напряжения машины, в цепь



обмотки возбуждения включают регулируемое сопротивление (ШР на рис. 60), т. наз. шунтовый реостат. В серийном генераторе (рис. 61) обмотка возбуждения присоединена последовательно

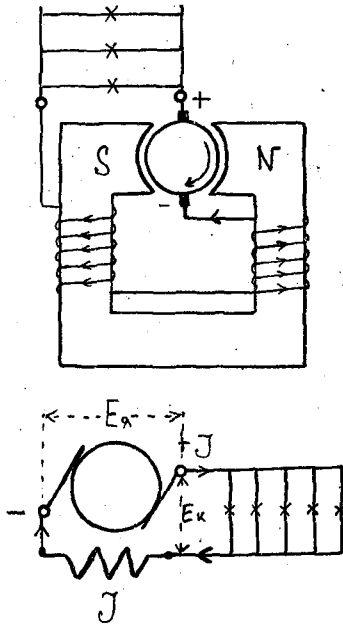


Рис. 61.

с обмоткой якоря и питается полным током машины. Для того, чтобы не создавать току якоря излишнего сопротивления при прохождении через обмотку возбуждения, последняя выполняется из толстого проводника, обладающего малым сопротивлением. Число витков серийной обмотки также берут небольшим, т. к. необходимые ампер-витки создаются здесь, гл. обр., за счет большого тока возбуждения. В компаундном генераторе (рис. 62) имеются обе обмотки: шунтовая и серийная, и магнитный поток создается здесь одновременным действием и того и другого возбуждения. Схемы возбуждения двигателей будут даны ниже. Отметим, что генераторы п. т. выполняются почти исключительно шунтовыми и компаундными, а двигатели — шунтовыми и серийными.

**Характеристики генераторов п. т.** Каждый тип машины характеризуется определенными рабочими свойствами,

выражаемыми определенными зависимостями одних величин (напр., эдс, напряжения, силы тока, числа оборотов и т. д.) от других (напр., тока возбуждения, нагрузочного тока и т. д.). Эти зависимости в силу особых свойств магнитной цепи не могут быть, в большинстве случаев, выражены математическими уравнениями, и их приходится выражать графически в виде кривых,

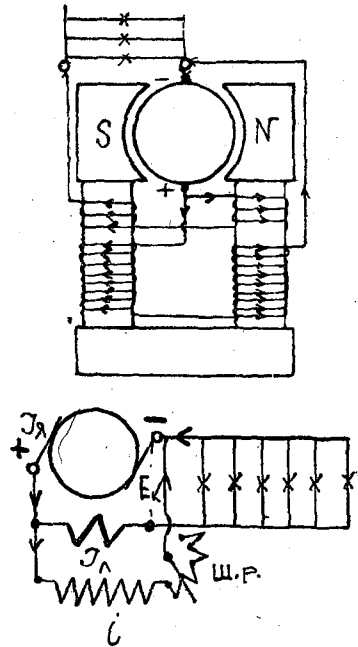


Рис. 62.

называемых характеристиками машины. Генераторы работают нормально с постоянной скоростью, поэтому характеристики, выражающие зависимости от числа оборотов, для генераторов не являются определяющими. Главнейшими кривыми следует здесь считать те, которые дают зависимость напряжения на зажимах машины от тока возбуждения и от нагрузочного тока. С одной из важнейших характеристик мы познакомились уже выше (рис. 55), — это характеристика намагничивания, в случае генератора называемая также характеристикой холостого хода. Последнее название возникло от того, что, если во вращающемся с нормальной скоростью ненагруженном генера-

торе изменять ток возбуждения и одновременно измерять с помощью вольтметра напряжение на зажимах машины, то, построив кривую зависимости между этими двумя величинами, мы и получим намагничивающую кривую. Действительно, напряжение при холостом ходе, вследствие отсутствия тока в якоре (в действительности якорь пропускает ток, необходимый для намагничивания машины, но величина его ничтожна по сравнению с током нагрузки), т.е. вследствие отсутствия падения напряжения и реакции якоря, численно равна (вернее, почти равна) эдс, которая в свою очередь пропорциональна магнитному потоку, а ток возбуждения пропорционален ампер-виткам возбуждения или напряженности магнитного поля. Описанным путем характеристика холостого хода может быть снята у генераторов с независимым возбуждением и у генераторов шунтовых или компаундных. У серьезных генераторов ток возбуждения одновременно является и током нагрузки, и поэтому здесь характеристику холостого хода можно снять, лишь отключив обмотку возбуждения от якоря и питая ее от независимого источника тока, т.е. превратив серьезное возбуждение в независимое. Если нагрузить машину, то при том же токе возбуждения напряжение на ее зажимах делается меньше, чем при холостом ходе, т.к. часть эдс должна быть затрачена на преодоление падения напряжения в обмотке якоря и контактах коллекторщетки в шунтовых машинах, а в серьезных и компаундных еще и на преодоление падения напряжения в обмотке возбуждения. Кроме того, сама эдс также уменьшится благодаря реакции якоря, возникающей при нагрузке. Если снять попрежнему зависимость напряжения от тока в возбуждении при некоторой постоянной нагрузке, то получится кривая, подобная характеристике холостого хода, но расположенная ниже ее, при чем тем ниже, чем больше нагрузка. Кривые, дающие указанную зависимость при различных нагрузках, называются нагрузочными характеристиками. Очевидно, характеристика холостого хода есть частный случай нагрузочной характеристики при токе

нагрузки, равном нулю. Наиболее важной и имеющей наибольшую практическую ценность является внешняя характеристика, представляющая зависимость между напряжением на зажимах и током внешней нагрузки при некотором постоянном сопротивлении цепи возбуждения и при постоянной скорости вращения, т.е. характеризующая как раз нормальный режим работы машины в установках. Внешняя характеристика для шунтовой машины показана на рис. 63 (кривая  $E_{\text{я}}$ ). Если бы при нагрузке машины не было бы ни

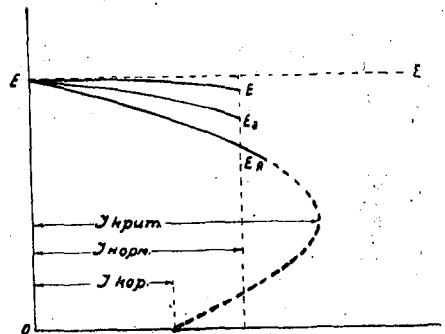


Рис. 63.

падения напряжения в цепи якоря, ни реакции якоря, то не было бы никаких причин для изменения напряжения, и внешняя характеристика представляла бы собой прямую линию, параллельную оси абсцисс. Т.к., однако, указанные явления в действительности существуют, то с увеличением нагрузки напряжение будет уменьшаться. Это уменьшение будет несколько расти еще и за счет того, что при постоянном сопротивлении цепи возбуждения ток возбуждения при увеличении нагрузки будет падать, так как он устанавливается напряжением на зажимах. Если бы изменение напряжения обуславливалось только изменением тока возбуждения, то мы получили бы кривую  $E_0$  (рис. 63), благодаря падению напряжения в цепи якоря получается дальнейшее снижение до кривой  $E_2$ , и, наконец, вследствие реакции якоря, действительное изменение будет происходить по кривой  $E_{\text{я}}$ . По мере возрастания нагрузки кривая  $E_{\text{я}}$  загибается все сильнее и, наконец, по достижении

некоторой, т. наз. критической силы тока напряжение падает настолько, что его уже недостаточно для самовозбуждения машины, кривая круто загибается, напряжение становится равным нулю, и ток будет поддерживаться только остаточным магнетизмом индуктора. Этот т. наз. ток короткого замыкания обычно меньше тока нормальной нагрузки, хотя в некоторых случаях, например в больших машинах, он может быть и несколько больше  $I_{\text{норм}}$ . В противоположность шунтовым машинам у генераторов серийс внешняя характеристика при увеличении нагрузки поднимается вверх, т. к. в этих машинах увеличение нагрузки связано с увеличением тока возбуждения. На рис. 64 кривая  $E_1$  представляет

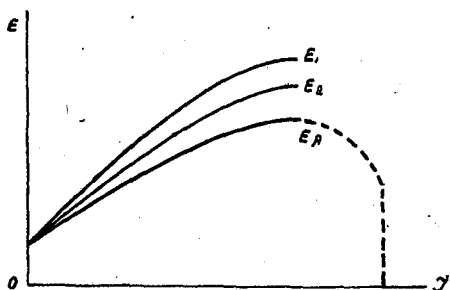


Рис. 64.

собой характеристику холостого хода, кривая  $E_2$  учитывает падение напряжения, а кривая  $E_3$ , учитывая еще и реакцию якоря, и является внешней характеристикой. Подъем кривой  $E_3$  совершается только до известного предела, т. к. в дальнейшем увеличение потока затрудняется насыщением магнитопровода, а падение напряжения и реакция якоря продолжают расти в той же степени. При некотором значении тока внешней нагрузки (ток короткого замыкания) напряжение падает до нуля. Ток короткого замыкания в серийсном генераторе может в несколько раз превосходить ток нормальной нагрузки и является поэтому опасным для целостности обмоток машины. В генераторах компаунд напряжение создается как шунтовой обмоткой (обуславливающей падающую кривую), так и серийсной обмоткой (обуславливающей подъем кривой), поэтому внешняя характеристика

этой машины может иметь различный характер в зависимости от того, действие какой обмотки преобладает. На рис. 65 показаны две типичных внеш-

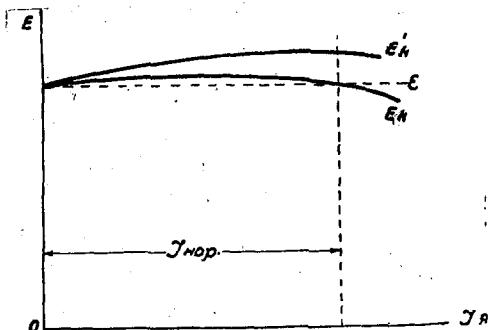


Рис. 65.

них характеристики компаундного генератора: с небольшим серийсным действием (кривая  $E_k$ ), когда напряжение остается почти постоянным независимо от нагрузки, и с сильным серийсным действием (перекомпаундирование), когда напряжение несколько растет с увеличением нагрузки.

*М. п. т. как двигатель.* Если зажимы м. п. т. присоединить к сети, то якорь ее придет во вращение и сможет тем самым совершать некоторую механическую работу за счет потребления электрической мощности из сети. Вращающий момент двигателя создается по закону Био-Савара (см. *теоретические основы электротехники*), вследствие взаимодействия между силовыми линиями магнитного поля машины и оживленными током проводниками обмотки якоря. Эта сила взаимодействия, будучи умножена на плечо (радиус якоря), и определяет собой вращающий момент двигателя. Следовательно,  $M = C_1 \Phi I_a$ , где  $\Phi$  — магнитный поток,  $I_a$  — сила тока в якоре и  $C_1$  — постоянная величина, зависящая от конструкции машины. При равномерной скорости вращения момент, развиваемый двигателем, должен вполне уравновешиваться моментом сопротивления нагрузки; если же момент вращения больше или меньше момента сопротивления, то якорь будет ускорять или замедлять свое вращение, пока не наступит равновесие. Схема включения шунтового дви-

гателя показана на рис. 66. Здесь Ш—шунтовая обмотка возбуждения, ШР—реостат для регулирования тока возбуждения, Пус. Р.—пусковой реостат,

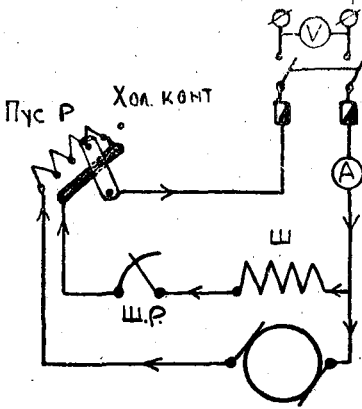


Рис. 66.

Хол. конт—холостый контакт пускового реостата. Назначение пускового реостата будет выяснено ниже. На рис. 67 показана схема включения серийного двигателя. Если находящийся в покое двигатель сразу присоединить к пол-

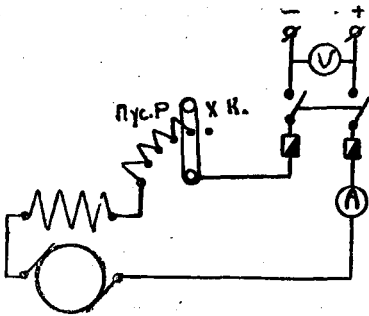


Рис. 67.

ному напряжению сети, то в него пойдет ток, определяемый равенством  $I_a = \frac{V}{R}$ , где  $V$ —напряжение сети, а  $R$ —сопротивление якоря, контакта коллектор-щеткой, а в серийных двигателях еще и обмотки возбуждения. Т. к. сопротивление  $R$  весьма мало, то ток  $I_a$  может оказаться в несколько раз больше тока нормальной нагрузки, что могло бы привести к выгоранию обмоток. При работе двигателя положение

изменяется, т. к. благодаря пересечению проводниками якоря силовых линий поля, в обмотке якоря индуктируется эдс, которая, как легко убедиться, воспользовавшись правилами левой и правой руки, направлена в сторону, противоположную напряжению, вследствие чего ее называют противоэлектродвижущей силой (пэдс). Следовательно, при вращении якоря ток будет равен

$$I_a = \frac{V - E}{R}, \text{ где } E \text{ — пэдс. Т. к. вращаю-}$$

щий момент пропорционален силе тока  $I_a$ , то, очевидно, двигатель будет при нагрузке вращаться с такой скоростью, чтобы пэдс имела величину, ограничивающую ток двигателя до необходимой величины, определяющей нужный момент вращения. Если момент вращения должен увеличиться, то должен увеличиться ток  $I_a$ , а, следовательно (при постоянных  $V$  и  $R$ ), должна уменьшиться пэдс  $E$ , т. е. двигатель должен сбавить свою скорость, и наоборот. С целью ограничения тока при пуске двигателя в ход, когда вследствие неподвижности якоря пэдс еще не наводится, необходимо на время пуска добавить последовательно с якорем дополнительное сопротивление—пусковой реостат (рис. 66 и 67), которое по мере разворачивания двигателя постепенно выключается. У пускового реостата устраивают холостой контакт, ставя на который ручку реостата размыкают цепь тока и тем самым останавливают машину. В шунтовых машинах пусковой реостат снабжается еще дополнительной полосой из меди, которая служит для постоянного соединения между сетью и обмоткой возбуждения. Если бы этой полосы не было и обмотка возбуждения присоединялась бы за пусковым реостатом, то при включении двигателя ток возбуждения, а, следовательно, и магнитный поток, были бы меньше нормальной величины, и вращающий момент при пуске (пусковой, или начальный момент) был бы сильно снижен. Т. к. пэдс определяется, как и у генератора, формулой  $E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} N \Phi 10^{-8} = C_2 n \Phi$  где  $C_2$ —постоянная для данной машины величина, то  $n = \frac{1}{C_2} \cdot \frac{E}{\Phi}$ , т. е. число оборотов двигателя пропорционально

педс и обратно пропорционально магнитному потоку  $\Phi$ . Выше мы имели формулу  $I_a = \frac{V - E}{R}$ , откуда следует, что  $E = V - I_a R$ . Тогда для числа оборотов мы можем еще получить выражение  $n = \frac{1}{C_2} \cdot \frac{V - I_a R}{\Phi}$ . Т. обр., регулирование числа оборотов двигателя можно осуществить уменьшением магнитного потока. Этот способ весьма легко использовать в шунтовом двигателе путем регулирования тока возбуждения с помощью шунтового реостата (рис. 66). В серийных двигателях это регулирование можно осуществить по одному из способов, показанных на рис. 68, т. е. включая сопротивление

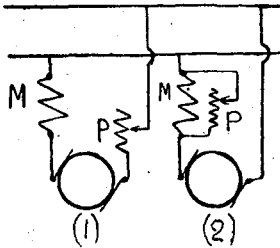


Рис. 68.

или в общую цепь машины (уменьшая силу тока, протекающего через двигатель), или параллельно обмотке возбуждения (уменьшая силу тока возбуждения). Эти способы неэкономичны, т. к. вызывают большие потери энергии в реостате и тем самым уменьшают к. п. д. двигателя. Поэтому, при необходимости регулирования числа оборотов у серийных двигателей, их спаривают и включают в сеть либо последовательно (рис. 69 сверху), либо параллельно (рис. 69 внизу). Тогда в первом случае к каждому двигателю подводится лишь половина напряжения сети, и число оборотов уменьшается (согласно формуле  $n = \frac{1}{C_2} \cdot \frac{V - I_a R}{\Phi}$ ) почти вдвое.

Этот способ регулирования (иногда не о двумя, а с несколькими двигателями) часто применяется в крановых установках и всегда для трамваев и электрических поездов, где переключение производится с помощью контроллеров.

**Характеристики двигателей п. т.**  
Работа двигателей совершается обычно при постоянном напряжении сети, и поэтому нас интересуют здесь гл. обр. зависимости числа оборотов и вращающего момента от нагрузки. У шунтовых двигателей число оборотов с нагрузкой уменьшается мало. Из выражения  $n = \frac{1}{C_2} \cdot \frac{V - I_a R}{\Phi}$  следует, что при увеличении  $I_a$  числитель уменьшается,

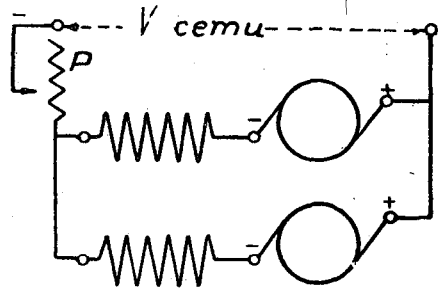
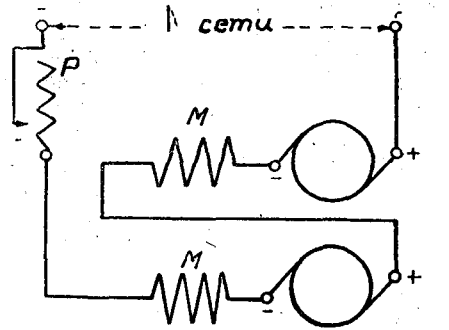


Рис. 69.

но знаменатель также уменьшается, т. к. реакция якоря ослабляет поток возбуждения. Обычно числитель уменьшается несколько быстрее, и  $n$  с нагрузкой несколько падает. В серийных двигателях с нагрузкой резко возрастает поток  $\Phi$ , т. е. знаменатель сильно увеличивается. Уменьшение же числителя относительно невелико, и поэтому здесь число оборотов с нагрузкой падает весьма резко. Что касается величины вращающего момента  $M = C_3 \cdot I_a \Phi$ , то для шунтовых двигателей, у которых поток весьма мало зависит от нагрузки, можно приблизительно считать  $\Phi = \text{const}$ , и тогда  $M = C_3 \cdot I_a$ , т. е. момент про-

порционален здесь первой степени тока. Для серийных двигателей, у которых поток приблизительно пропорционален силе тока нагрузки, можно написать  $M = C_4 I_a^2$ , т.е. момент пропорционален здесь квадрату силы тока, другими словами—увеличивается с нагрузкой очень резко. Обратим внимание еще на одну особенность серийного двигателя. Если такой двигатель запустить вхолостую, то через его якорь будет проходить весьма малый ток, т. к. момент сопротивления будет обусловлен только потерями и потребует очень небольшого момента вращения. Т. к. ток якоря одновременно является и током возбуждения, то вызванный им поток также будет почти равен нулю,

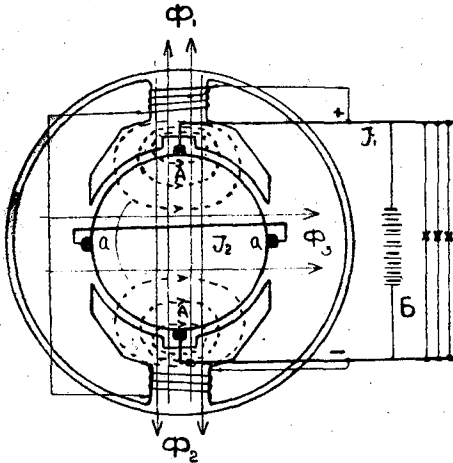


Рис. 70.

что на основании предыдущей формулы вызовет повышение числа оборотов до недопустимо большого значения, опасного для механической прочности двигателя. Это явление называется разносом. Если по условиям эксплуатации требуется иметь серийный двигатель, который допускал бы работу вхолостую, то прибегают к устройству небольшой дополнительной шунтовой обмотки (т.е. берут компаундный двигатель), которая ограничивала бы число оборотов холостого хода. Здесь обе обмотки создают поток, направленный в одну и ту же сторону. Иногда встречаются двигатели компаундного типа с встречным соединением обмоток, где потоки шун-

товой и серийной обмоток направлены в разные стороны. Такие двигатели применяются, если желательно сохранить постоянное число оборотов, независимо от нагрузки.

*Специальные м. п. т.* Мы рассмотрим здесь лишь машины для освещения поездов и для электросварки. Машины для освещения поездов должны давать неизменный ток независимо от скорости движения поезда. Наиболее распространенным типом такой машины является машина Розенберга (рис. 70). Обмотка полюсов создает поток  $\Phi_1$ , направленный снизу вверх. При вращении якоря этот поток создает на щетках  $a-a$  напряжение, заставляющее протекать по обмотке якоря ток, т. к. щетки  $a-a$  замкнуты накоротку. Этот ток создает в свою очередь поперечный поток (поток реакции якоря)  $\Phi_2$ . При пересечении проводниками якоря потока  $\Phi_2$  создается напряжение на щетках  $A-A$ , питающее ток внешней сети. Ток внешней нагрузки, проходя через якорь, создает свой поток  $\Phi_3$ , направленный против  $\Phi_1$ . Т. к. магнитное сопротивление поперечному потоку  $\Phi_3$ , благодаря сильно развитым полюсным наконечникам, невелико, то этот поток достигает здесь большой величины. Если так рассчитать машину, чтобы продольный поток  $\Phi_1 - \Phi_3$  при нормальном режиме составлял бы лишь около 10% от потока  $\Phi_1$ , то возрастание рабочего тока будет ограничено, т. к. иначе разность  $\Phi_1 - \Phi_2$  сделается настолько малой, что никакой эдс на щетках  $a-a$  индуцироваться не будет. Если ток нагрузки по какой-либо причине упадет, то разность  $\Phi_1 - \Phi_3$  увеличится, что вызовет увеличение напряжения на щетках  $a-a$  и возрастание поперечного потока. Последнее обстоятельство, в свою очередь, вызовет увеличение напряжения на щетках  $A-A$ , что снова заставит увеличиться рабочий ток во внешней цепи. Т. обр., несмотря на изменение числа оборотов, сила тока во внешней цепи будет поддерживаться постоянной. При остановке поезда питание сети с помощью особого автомата переходит к батарее аккумуляторов, показанной на чертеже справа и заряжаемой во время хода поезда.

В машинах для электросварки необходимо иметь неизменную, в некоторых пределах, силу тока, независимо от величины напряжения на зажимах. Эта задача может быть решена несколькими путями. Ниже описан сварочный агрегат американской фирмы Вестингауз. Как видно из рис. 71, здесь на одном валу сидят три машины: генератор  $G$ ,

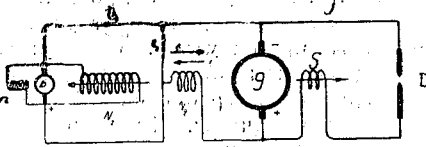


Рис. 71.

возбудитель  $B$  и двигатель  $A$ , вращающий весь агрегат. Генератор  $G$  имеет 3 обмотки возбуждения: обмотка  $N_1$  питается от возбудителя  $B$ , обмотка  $N_2$  питается одновременно от возбудителя  $B$  и от самого генератора  $G$  и, наконец, обмотка  $S$  питается рабочим током генератора  $G$ . Последняя обмотка создает поле, направленное противоположно полю обмотки  $N_1$ , т.е. обмотка  $S$  является противокомпаундной. Обмотка  $N_1$  создает полезный поток. Обмотка  $N_2$  может обтекаться током в разных направлениях, в зависимости от величины сопротивления вольтовой дуги  $D$ . При разомкнутых электродах дуги (или при нормальной длине дуги) обмотка  $N_2$  возбуждается главным образом генератором  $G$  и создает поле, направленное в ту же сторону, что и поле  $N_1$ ,

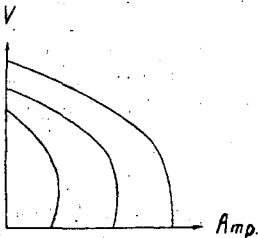


Рис. 72.

стрелка 1). При коротком замыкании дуги  $D$  напряжение на щетках генератора  $G$  почти падает до нуля, и ток в обмотке  $N_2$  устанавливается возбудителем  $B$  в обратном направлении (стрелка 2), и поток генератора  $G$  ослабляется. На рис. 72 показаны внешние

характеристики при различных возбуждениях, из которых видно, что сила тока, начиная от некоторого напряжения до нуля, остается приблизительно постоянной.

*Конструкция э. м. п. т.* На рис. 73 показана м. п. т. фирмы Сименс-Шукерт 20 квт,  $n = 1.250$ . Слева и справа

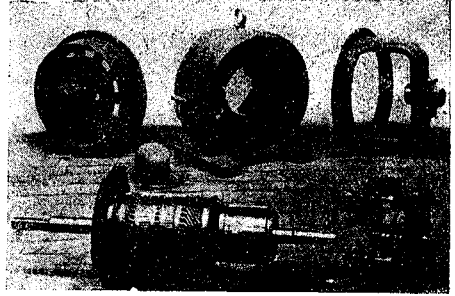


Рис. 73.

стоят подшипниковые щиты, посередине — корпус, у которого видны главные (широкие) и дополнительные (узкие) полюса. Рядом стоит крышка, прикрывающая зажимы (видны слева на корпусе). На переднем плане слева расположен якорь с обмоткой и коллектором. На якоре слева сидит вентилятор, служащий для продувания воздуха через машину с целью ее охлаждения во время работы. Справа внизу — щеточная траверза с 6 щетками на каждом из 4 пальцев (машина имеет 4 полюса).

На рис. 74 показан мощный электродвигатель того же завода на 5.000 квт

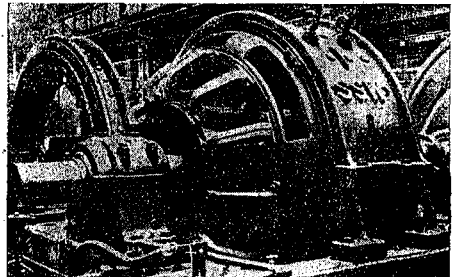


Рис. 74.

при 100 об/м. предназначенный для привода прокатного стана. Диаметр

якоря этой машины 1.900 мм, диаметр коллектора 1.450 мм. На рис. 75 показан щеткодержатель со щеткой размером 32×16 мм. Таких щеткодержателей,



Рис. 75.

как видно из рис. 73 и 74, на каждый палец насаживается несколько.

**Трансформаторы (т-ры). Холостый ход т-ра.** На рис. 76 показан в схематическом виде однофазный т-р, состоящий из замкнутого магнитопровода

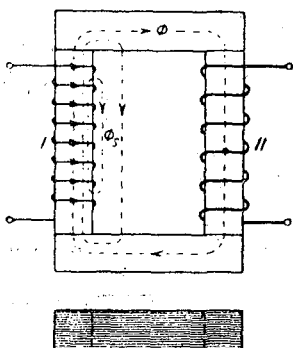


Рис. 76.

(сердечника), изготовляемого во избежание больших потерь на перемагничивание из тонких, изолированных друг от друга листов железа, и из двух обмоток, первичной (I) и вторичной (II). Обмотки расположены на боковых частях сердечника, т. наз. стержнях. Верхняя и нижняя части сердечника, не несущие обмотки и служащие лишь для замыкания магнитной цепи, называются ярмами. Предположим, что

внешние зажимы вторичной обмотки разомкнуты, и подведем к зажимам первичной обмотки напряжение сети. Такой режим работы т-ра называется холостым ходом. Под влиянием приложенного напряжения в первичной обмотке будет проходить ток, который, будучи переменным, создаст в магнитопроводе т-ра переменный магнитный поток. Т. к. магнитное сопротивление т-ра невелико (вследствие отсутствия воздушных промежутков, необходимых во вращающихся машинах), то для создания потока потребуется ток незначительной величины. Пульсирующий поток, будучи сцеплен с витками вызывающей его обмотки, наводит в ней эдс самоиндукции, направленную противоположно приложенному напряжению, т. к. она, как и всякая эдс самоиндукции, стремится препятствовать прохождению тока. Т. к. железо т-ра не обладает все же бесконечно большой магнитной проницаемостью, то часть силовых линий потока (хотя и незначительная) будет замыкаться вокруг обмотки непосредственно (поток  $\Phi_s$  на рис. 76), в то время как другая, большая часть (поток  $\Phi$ ) будет проходить исключительно в железе. Магнитная проницаемость воздуха постоянна, и поэтому поток  $\Phi_s$  будет пропорционален току первичной обмотки, связь же между потоком  $\Phi$  и током определяется кривой намагничивания, т. е. насыщением железа. Поэтому, целесообразно действие потоков  $\Phi$  и  $\Phi_s$ , т. е. наведение ими эдс самоиндукции, рассматривать отдельно, т. е. предполагать, что в первичной обмотке индуктируются 2 эдс:  $E_1$  — от „главного потока“  $\Phi$ , и эдс рассеяния  $E_{1s}$  — от „потока рассеяния“  $\Phi_s$ . Эдс  $E_1$ , как известно (см. *теоретические основы электротехники*), определяется формулой  $E_1 = 4,44fw_1\Phi \cdot 10^{-8}$ . Здесь  $E_1$  — эффективное значение эдс,  $f$  — частота тока,  $w_1$  — число витков первичной обмотки,  $\Phi$  — амплитуда потока. По общему правилу, эдс  $E_1$  отстает от вызывающего ее потока на угол  $90^\circ$ . Эдс  $E_{1s}$ , вызываемая потоком  $\Phi_s$ , так же как и он пропорциональна току первичной обмотки. Обозначая этот ток при холостом ходе через  $I_p$ , можно



написать, что  $E_{1s} = x_1 I_\mu$ , где  $x_1$ —коэффициент пропорциональности, зависящий от скорости изменения потока (т.е. частоты тока) и от коэффициента самоиндукции обмотки, определяющего величину потока  $\Phi_s$ . Как известно,  $x_1 = \omega S_1$ , где  $\omega$ —круговая частота тока =  $2\pi f$ , а  $S_1$  — самоиндуктивность рассеяния. Т. к.  $x_1 = \frac{E_{1s}}{I_\mu}$  имеет раз-

мерность сопротивления, то его часто называют индуктивным сопротивлением первичной обмотки. Подведенное к первичной обмотке напряжение  $V_1$  должно уравновесить т. обр. эдс  $E_1$  и эдс  $E_{1s}$ . Т. к. при прохождении тока  $I_\mu$  через первичную обмотку в ней благодаря наличию омического сопротивления  $R_1$  возникает падение напряжения  $I_\mu R_1$ , то напряжение  $V_1$  должно покрыть и эту потерю.

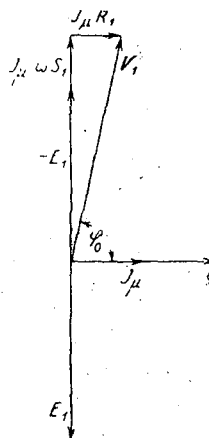


Рис. 77.

Т. обр. мы приходим к следующей диаграмме т-ра при его холостом ходе (рис. 77). По горизонтали отложен ток  $I_\mu$  и в фазе с ним поток  $\Phi$ . Эдс  $E_1$  отстает от потока на угол  $90^\circ$  и поэтому отложена вниз по вертикали. Составляющая напряжения, уравновешивающая  $E_1$ , направлена поэтому по вертикали вверх (на диаграмме —  $E_1$ ). В ту же сторону направлена составляющая  $I_\mu \omega S_1 = I_\mu x_1$ , уравновешивающая эдс рассеяния  $E_{1s}$ . В фазе с током отложена составляющая напряжения  $I_\mu R_1$ , компенсирующая падение напряжения в первичной обмотке. Замыкающая этих трех векторов и дает нам по величине и по фазе напряжение у зажимов первичной обмотки  $V_1$ . Т. к. величина омического падения напряжения весьма мала по сравнению с векторами  $E_1$  и  $E_{1s}$ , то угол  $\phi$  почти равен  $90^\circ$ , т.е.  $I_\mu$  является почти чисто реактивным током. Вторичная обмотка т-ра, как видно из

рис. 76, пронизывается главным потоком  $\Phi$ , благодаря чему в ней также наводится эдс взаимной индукции.  $E_2 = 4,44 f w_2 \Phi 10^{-8}$ , где  $w_2$ —число витков вторичной обмотки. Ни эдс рассеяния, ни омического падения напряжения во вторичной обмотке нет, т. к. ее зажимы разомкнуты и, следовательно, в ней нет тока и собственного потока. Отношения эдс  $E_1$  и  $E_2$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 f w_1 \Phi 10^{-8}}{4,44 f w_2 \Phi 10^{-8}} = \frac{w_1}{w_2}$$

равно отношению чисел витков соответственных обмоток. Благодаря небольшой величине тока  $I_\mu$ , а, следовательно, и потока рассеяния и омического падения напряжения, можно считать, что при холостом ходе  $E \approx V_1$ . Т. к., кроме того, эдс  $E_2$  является напряжением на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе, т.е.  $E_2 = V_2$ , то

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Это отношение называется коэффициентом трансформации, или передаточным числом т-ра, и обычно обозначается буквой  $u$ . Отметим еще, что до сих пор мы предполагали, что весь ток холостого хода идет исключительно на создание потоков  $\Phi$  и  $\Phi_s$ , тогда как в действительности этот же ток должен покрывать еще и потери в железе (на гистерезис и токи Фуко). Другими словами, ток холостого хода должен иметь две составляющих—активную, покрывающую потери, и реактивную, создающую поле. Т. к. первая составляющая обычно гораздо меньше второй и, кроме того, они сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ , то их результирующая, действительный ток холостого хода  $I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_h^2} \approx I_\mu$ . В дальнейшем, при построении полной диаграммы при нагрузке это обстоятельство будет учтено.

**Нагрузка т-ра.** Если вторичные зажимы т-ра замкнуть на какое-либо сопротивление (активное, реактивное или смешанное), то под влиянием эдс  $E_2$  через это сопротивление пойдет ток, и т-р нагрузится, т.е. будет отдавать мощность во вторичную цепь. В силу закона сохранения энергии первичная обмотка должна при этом увеличивать потребление мощности из первичной

сети, т. к. за вычетом потерь в самом т-ре обе мощности должны быть равны. Если напряжение  $V_1$  постоянно, то увеличение потребления мощности может идти лишь за счет увеличения силы тока первичной обмотки. Т. к. разница между  $V_1$  и  $E_1$ , обусловленная омическим падением напряжения  $I_1 R_1$  и эдс рассеяния  $E_{1s} = I_1 x_1$  (эту величину мы будем в дальнейшем называть индуктивным падением напряжения) даже при значительной величине  $I_1$  невелика (всего несколько процентов), то можно приближенно считать эдс  $E_1$  постоянной, а, следовательно, постоянным и поток  $\Phi$ , вызывающий эту эдс. Другими словами, мдс  $AW_m = I_1 w_1$  при всех режимах работы должна оставаться приблизительно постоянной. Т. к. эта мдс доставляется первичной обмоткой, то при увеличении тока  $I_2$ , т. е. мдс  $I_2 w_2$  во вторичной обмотке, в первичной обмотке должен появляться дополнительно такой ток  $I_1'$ , чтобы созданная им мдс  $I_1' w_1$  была равна и противоположна  $I_2 w_2$ . Таким образом, полную мдс первичной обмотки  $I_1 w_1$  можно представить себе состоящей из геометрической суммы

$$\text{мдс из } I_1 w_1 \text{ и } I_1' w_1 = -I_2 w_2, \text{ т. е. } I_1 w_1 = I_1 w_1 - I_2 w_2, \text{ или } I_1 w_1 = I_1 w_1 + I_2 w_2.$$

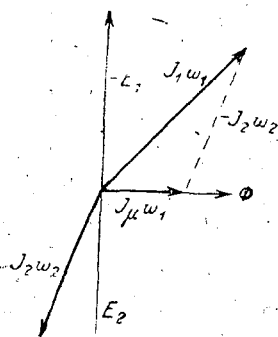


Рис. 78.

Другими словами, мдс холостого хода должна быть равна геометрической сумме первичной и вторичной мдс. Сказанное иллюстрирует диаграмма мдс, показанная на рис. 78. Т. к. при нормальной работе т-ра  $I_1 w_1$  невелико по сравнению с  $I_1 w_1$  и  $I_2 w_2$ , то, полагая приближенно  $I_1 w_1 = I_2 w_2$ , можно написать

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1} \approx \frac{1}{u}$$

Если бы первичные и вторичные витки были одинаковы ( $w_1 = w_2$ ), то диаграмма мдс являлась бы одновременно диаграммой токов. Кроме того, эдс  $E_1$  и  $E_2$  выражались бы на диаграмме напряжений отрезками одинаковой длины. При этом как начертание диаграммы, так и ее анализ значительно бы упростились. Поэтому в действительных условиях, когда  $w_1 \neq w_2$ , прибегают к помощи т. наз. приведенных величин. Если разделить все мдс на диаграмме рис. 78 на  $w_1$ , то мы получим диаграмму

трех токов:  $I_1, I_1$  и  $I_2' = I_2 \frac{w_2}{w_1}$ . Величина  $I_2'$  называется приведенным током вторичной обмотки. Величину приведенной эдс вторичной обмотки  $E_2'$  мы найдем из условия равенства вторичных мощностей действительного и приведенного трансформатора  $E_2 I_2 = E_2' I_2'$  откуда  $E_2' = E_2 \frac{I_2}{I_2'}$  или, так как  $\frac{I_2}{I_2'} = \frac{w_1}{w_2}$ , то  $E_2' = E_2 \frac{w_1}{w_2}$ . Т. к., кроме того,  $E_2 \frac{w_1}{w_2} = E_1$ , то  $E_2' = E_1$ . Приведенные вторичные сопротивления получаются, как

$r_2' = r_2 \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2$  и  $x_2' = x_2 \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2$ , т. к. сопротивление определяется отношением напряжения к току, а  $\frac{w_1}{w_2} : \frac{w_2}{w_1} = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2$ .

Вводя во вторичную цепь приведенные величины вместо действительных, мы, не нарушая условий работы, значительно упрощаем все исследование. При прохождении тока во вторичной обмотке в ней также возникает омическое падение напряжения  $I_2' R_2'$  (или  $I_2' R_2$ ) и эдс рассеяния  $E_{2s} = I_2' x_2' = I_2 x_2$  (или  $E_{2s}' = I_2' x_2'$ ), вызываемая полем рассеяния вторичной обмотки и проявляющаяся в виде индуктивного падения напряжения. Вычитая из  $E_2'$  величины  $I_2' x_2'$  и  $I_2' R_2'$ , мы получаем вторичное напряжение т-ра  $V_2$ . В действительности явление рассеяния протекает в т-ре несколько сложнее, и в некоторые моменты времени оба потока рассеяния, вторичный и первичный, создаются лишь одной обмоткой, но при построении диаграмм и исследовании работы т-ра результаты остаются совершенно одинаковыми и при той, и при другой картине рассеяния; т. к. нам важны не самые потоки рассеяния, а те индуктивные падения напряжения, которые ими вызываются.

Построение диаграммы т-ра при нагрузке показано на рис. 79, где нагрузка вторичной цепи предположена индуктивной, т. е. ток отстает

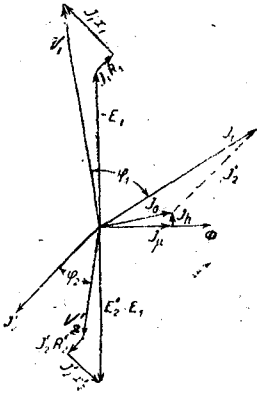


Рис. 79.

от напряжения на угол  $\varphi_2$ . Сперва чертим вектор вторичного приведенного тока  $I_2'$ , затем под углом  $\varphi_2$  к нему откладываем приведенное вторичное напряжение  $V_2'$ . От конца вектора  $V_2'$  откладываем в фазе с током приведенное омическое падение напряжения во вторичной обмотке  $I_2'R_2'$  и под углом в  $90^\circ$  к току приведенное вторичное индуктивное падение напряжения  $I_2'x_2'$ . Замыкающая этих трех векторов дает нам приведенную вторичную эдс  $E_2'$ . Под углом  $90^\circ$  к  $E_2'$  в сторону опережения откладываем магнитный поток  $\Phi$  и в фазе с ним — реактивную составляющую тока холостого хода  $I_\mu$  (т. наз. намагничивающий ток). Отложив от конца  $I_\mu$  активную составляющую тока холостого хода  $I_h$  (под углом  $90^\circ$ ), получаем результирующий ток холостого хода  $I_0$ . Далее, отложив от конца  $I_0$  вектор  $-I_2'$ , получаем первичный ток  $I_1$ . Первичная эдс  $E_1$ , равная  $E_2'$ , должна быть также отложена вниз. В противоположную сторону откладываем вектор  $-E_1$ , составляющую первичного напряжения, уравнивающую эдс  $E_1$ . Наконец, откладывая от конца  $-E_1$  омическое падение напряжения  $I_1R_1$  (в фазе с током) и индуктивное падение напряжения  $I_1x_1$  (под углом  $90^\circ$  к току), получаем в качестве замыкающей стороны вектор первичного напряжения  $V_1$ . Сдвиг фаз между током и напряжением первичной цепи определяется углом  $\varphi_1$ . Таким же точно образом строятся диаграммы и для безиндукционной или емкостной нагрузки вторичной цепи. Если пренебречь током холостого хода и повернуть нижнюю часть диаграммы рис. 79 так, чтобы совпали векторы  $E_2'$  и  $-E_1$ , то получится чертеж, пока-

занный на рис. 80. Т. к. при  $I_0=0, I_1=I_2'$ , то сумма омических падений напряжений первичной и вторичной обмоток будет составлять  $I_1R_1+I_2'R_2'=I_1(R_1+R_2')=I_1\Sigma R$  и будет равна вектору  $AB$ . Точно так же сумма индуктивных падений напряжения выразится у-нием  $I_1x_1+I_2'x_2'=I_1(x_1+x_2')=I_1\Sigma x$  и будет равна вектору  $BC$ . Вектор  $AC$  даст нам полное падение напряжения в т-ре  $I_1\Sigma z$ . Если теперь из точки  $O$  описать дугу радиусом  $OA$ , то отрезок  $CD$  даст нам величину падения напряжения в т-ре  $V_1-V_2$ .

**Короткое замыкание т-ра.** Под нормальным коротким замыканием т-ра понимается режим, при котором вторичная обмотка замкнута коротко, а к первичной обмотке подведено такое пониженное напряжение  $V_{1к}$ , которое устанавливает во вторичной обмотке ток нормальной величины ( $I_{2к}=I_{2норм}$ ). Т. к. при этом  $V_2=0$ , то эдс  $E_2$  должна покрывать только омическое и индуктивное падение напряжения. Для создания такой эдс потребуется весьма малый поток, а, следовательно, и незначительный ток холостого хода. Поэтому при коротком замыкании  $I_1$  еще менее отличается от  $I_2'$ , чем при нормальной работе, и практически оба тока будут равны. Т. обр., пренебрегая током  $I_0$ , можно считать, что при коротком замыкании напряжение  $V_{1к}$  уравнивает лишь падение напряжения в обеих обмотках. На рис. 80 полное падение напряжения в т-ре изображается отрезком  $AC$ . Поэтому, если диаграмма построена для нормального тока, то при нормальном коротком замыкании вектор  $AC$  представляет собой первичное напряжение  $V_{1к}$ . Т. обр. треугольник  $ABC$  представляет собой диаграмму короткого замыкания. На этом основании  $\Sigma r = r_1 + r_2$  обоз-

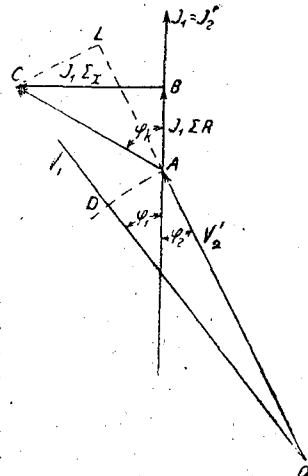


Рис. 80.

начают через  $r_k$  и называют омическим сопротивлением короткого замыкания. Аналогично, индуктивным сопротивлением короткого замыкания называют величину  $x_k = \sum x = x'_1 + x'_2$  и кажущимся сопротивлением короткого замыкания  $z_k = z_1 + z'_2$ . Весь треугольник  $ABC$  называется треугольником короткого замыкания. Из рис. 80 следует, что

$$AC = V_{1k} = I_{1k} z_k = I_{1k} \sqrt{r_k^2 + x_k^2}.$$

У современных т-ров напряжение короткого замыкания  $V_{1k}$  составляет обычно от 3 до 8% нормального первичного напряжения  $V_1$ .

**Трехфазные т-ры.** Для трансформирования трехфазного тока можно взять три однофазных т-ра и соединить их обмотки между собой в звезду или треугольник. Такая система иногда применяется для мощных устройств, с целью повысить эксплуатационные удобства, в частности уменьшить резерв. Однако, нормальным типом трехфазного трансформатора следует в настоящее время считать показанную на рис. 81 конструкцию, в которой

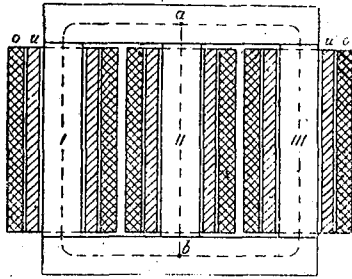


Рис. 81.

имеется три стержня, связанных верхним и нижним ярмами в один общий магнитопровод. На каждом стержне расположены обе обмотки (высокого напряжения  $o$  и низкого напряжения  $u$ ) одной фазы. Отметим, кстати, что такая же система расположения на каждом стержне обеих обмоток всегда применяется и в однофазных т-рах с целью уменьшения рассеяния. Первичные и вторичные обмотки отдельных фаз и здесь соединяются в звезду или треугольник. Т. к. три напряжения трехфазной системы в сумме равны нулю, то и сумма возбужденных ими

трех магнитных потоков также равна нулю, чем и объясняется возможность выполнения сердечника по рис. 81. Т. к. пути прохождения потока для всех фаз неодинаковы (расстояние от  $a$  до  $b$  для крайних фаз больше, чем для средней), то и намагничивающие токи всех фаз неодинаковы, что, впрочем, благодаря ничтожной величине  $I_m$  не имеет никакого практического значения. Все найденные нами выше соотношения для однофазного т-ра в полной мере применимы для каждой фазы трехфазного т-ра и поэтому, например, диаграмма трехфазного т-ра будет представлять собой совокупность трех одинаковых однофазных диаграмм. Однако, если нагрузки всех трех фаз будут не одинаковы, то различными будут и диаграммы для каждой фазы. Первичная и вторичная обмотки трехфазного т-ра могут быть соединены след. образом: обе в звезду, обе в треугольник, первичная в звезду—вторичная в треугольник, или первичная в треугольник—вторичная в звезду. Соединение треугольником имеет то преимущество, что при порче обмотки одной фазы питание всех трех фаз вторичной цепи не нарушается. С другой стороны, при соединении звездой каждая обмотка находится под напряжением в  $\sqrt{3}$  раз меньше, чем линейное, благодаря чему облегчается задача конструктора в отношении изоляции, что особенно важно при очень высоких напряжениях. При соединении звездой часто выводят еще и нулевой провод для того, чтобы иметь возможность использовать фазовое напряжение для ламп накаливания, а междуфазовое—для питания двигателей. При этом, однако, легко может быть нарушена симметрия нагрузок отдельных фаз, что вызовет искажение напряжений, т. е. повышение напряжения одних фаз за счет понижения его в других фазах. С точки зрения неравномерных нагрузок более выгодными являются соединения треугольник—треугольник, звезда—треугольник и звезда—звезда без нулевого провода. Для того, чтобы питать от одного т-ра две сети с различными напряжениями, в настоящее время применяют трехобмоточные т-ры, имеющие одну

первичную и две вторичных обмотки, сидящие на одном стержне. Каждая из трех обмоток может быть соединена или в треугольник, или в звезду. При равномерной нагрузке всех трех фаз, мдс первичной обмотки равна геометрической сумме обеих вторичных мдс (если пренебречь током холостого хода).

**Параллельная работа т-ров.** В тех случаях, когда два или несколько т-ров должны работать параллельно, требуется соблюдение определенных условий, а именно: напряжения вторичных обмоток должны быть равны при холостом ходе и при нагрузке. Последнее условие требует одинаковости падений напряжений, т.е., другими словами, одинаковости треугольников короткого замыкания. Оба эти условия диктуются требованием, по которому нагрузки параллельно работающих т-ров должны распределяться пропорционально их мощностям. Кроме того, сдвиг фаз между вторичными напряжениями у всех т-ров должен равняться нулю, т.к. иначе даже при равенстве напряжений появится некоторая разность потенциалов, вызывающая уравнивающие токи между т-рами. В трехфазных т-рах вторичные напряжения можно сделать совпадающими по фазе, когда включения первичных и вторичных обмоток одинаковы, напр.: первичные везде звездой или треугольником и вторичные всегда треугольником или звездой. Никим образом нельзя включать первичные обмотки одинаково, т.е. все звездой или все треугольником, а вторичные обмотки смешанно, т.е. одни звездой, а другие — треугольником. Наоборот, можно соединить для параллельной работы два т-ра, у одного из которых включения обмоток будет звезда — звезда, а у другого треугольник — треугольник. Для удобства регулирования напряжения в сетях и для достижения правильного распределения нагрузок в параллельно работающих т-рах, на стороне высокого напряжения устраиваются дополнительные выводы, которые позволяют включать и выключать определенное число витков и тем регулировать напряжение (обычно в пределах  $\pm 5\%$ ).

**Автотрансформаторы.** В обычных т-рах обмотки высокого и низкого напряжения устраиваются совершенно отдельными и изолированными друг от друга. Можно, однако, обойтись всего одной обмоткой, как показано на рис. 82. Такая конструкция называется

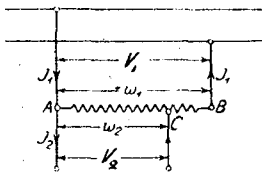


Рис. 82.

автотрансформатором. Если напряжение  $V_1$  подведено к точкам A и B, т.е. к концам обмотки, то между точками A и C будет действовать напряжение  $V_2$ , которое так относится к  $V_1$ , как число витков  $w_2$  относится к числу витков  $w_1$ . Если ток „первичной“ обмотки (AB) составляет  $I_1$  ампер и ток вторичной нагрузки составляет  $I_2$  ампер, то в части AC протекает разность токов  $I_2 - I_1$ , так как токи  $I_1$  и  $I_2$ , как и у всякого т-ра, сдвинуты по фазе почти на угол  $180^\circ$ . Вследствие этого сумма потерь в автотрансформаторе меньше, чем в обычном т-ре с двумя отдельными обмотками, по которым проходят токи  $I_1$  и  $I_2$ . Кроме того, у обычного т-ра вся энергия трансформируется электромагнитным путем, т.е. через посредство общего для обеих обмоток магнитного потока Ф. У автотрансформатора же часть энергии первичной цепи непосредственно переходит во вторичную, и только другая часть передается электромагнитно. Вследствие этого размеры и вес автотрансформатора меньше, а кпд больше, чем у обычного т-ра той же мощности. Полная вторичная мощность автотрансформатора

$$\left(u = \frac{w_1}{w_2}\right) W_2 = W_2 \frac{u-1}{u} + W_2 \frac{1}{u} = W_2' + W_2''.$$

Мощность  $W_2' = W_2 \frac{u-1}{u}$  передается трансформаторным путем, а мощность  $W_2'' = W_2 \frac{1}{u}$  — непосредственно из первичной сети. Следовательно, при одном и том же весе автотранс-

форматор может дать мощность в  $\frac{u}{u-1}$  большую, чем т-р с двумя обмотками. Очевидно, это преимущество тем заметнее, чем меньше коэффициент трансформации  $u$ . Поэтому главное применение автотрансформаторы находят при небольших коэффициентах трансформации (обычно до  $u=3$  и меньше). Показанную на рис. 82 схему можно применить и для повышения напряжения, если питать автотрансформатор в точках  $A$  и  $C$  и брать от него энергию в точках  $A$  и  $B$ . Само собой разумеется, что автотрансформаторы могут применяться и для трехфазного тока.

**Конструкция т-ров.** Для того, чтобы иметь возможность изготовить обмотку т-ра заранее на шаблоне, необходимо сердечник т-ра сделать разъемным. При этом, однако, стыки должны быть

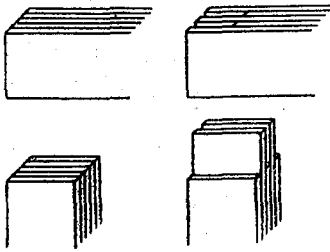


Рис. 83.

достаточно плотные, чтобы не увеличивать магнитное сопротивление и тем самым не получать слишком большой намагничивающий ток. Стыки между стержнями и ярмом устраивают либо по типу левого чертежа рис. 83 (тупой

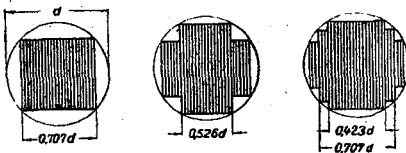


Рис. 84.

стык), когда листы стержня плотно прилегают к ярму и стягиваются в таком положении боковыми болтами, либо по типу правого чертежа того же рис. 83 (стык в переплет), когда отдельные листы стержня входят между листами ярма. Формы сечения стержней показаны на рис. 84. В небольших

т-рах можно ограничиться квадратной формой сечения, при больших же мощностях берут ступенчатую форму, чтобы лучше использовать пространство внутри обмотки. Обмотки т-ров устраивают либо по типу цилиндрических, либо по типу дисковых. Цилиндрическая, обмотка показана на рис. 85. Здесь обмотки высокого и низкого напряжения расположены концентрически одна внутри другой, при чем ближе к железу помещают обмотку

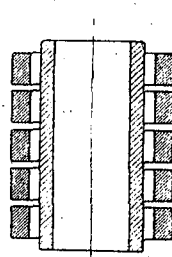


Рис. 85.

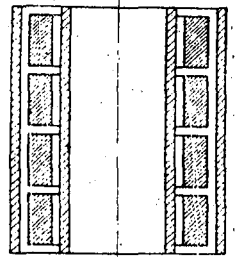


Рис. 86.

низкого напряжения, т. к. ее легче изолировать от стержня. Для уменьшения рассеяния можно обмотку низкого напряжения разделить на два цилиндра, между которыми размещается обмотка высокого напряжения, как показано на рис. 86. В случае дисковой обмотки имеется ряд плоских катушек, принадлежащих по очереди высокому и низкому напряжению (рис. 87). Для лучшей изоляции обмотку конструируют так, чтобы

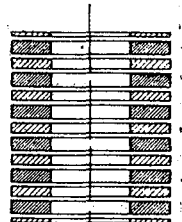


Рис. 87.

крайние катушки принадлежали к низкому напряжению, при чем для уменьшения рассеяния крайние катушки устраивают с половинным числом витков. На рис. 88 показан полуобмотанный сердечник трехфазного т-ра на 500 ква, 6.000/400 в. Здесь на левом стержне имеются уже обе обмотки, на среднем — только обмотка низкого напряжения, а правый стержень еще не обмотан. Тот же т-р в готовом виде показан на рис. 89. Этот т-р помещается затем в железный бак (на

черт. слева), заполненный маслом и имеющий для лучшего охлаждения ребристые стенки. При еще больших

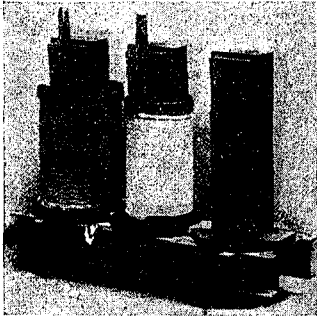


Рис. 88.

мощностях и такого способа охлаждения уже недостаточно, и приходится в бак помещать систему труб с прочной водой. Подобная конструкция

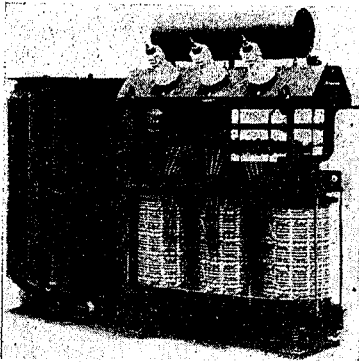


Рис. 89.

трехфазного т-ра мощностью 6.000 ква показана на рис. 90, где в верхней части ясно видна система ребристых (для лучшей теплопередачи) охлаждающих труб.

**Асинхронные двигатели** (а. д.). Статор а. д. имеет обычную обмотку переменного тока (см. выше). В громадном большинстве случаев а. д. устраивается трехфазным, и тогда его обмотка создается при питании трехфазным током вращающееся магнитное поле. Обмотка ротора выполняется или в виде беличьего колеса, или в виде двухслойной обмотки трехфазного тока. Вра-

щающееся поле статора вызывает в роторной обмотке токи, которые, взаимодействуя с магнитным потоком, и создают вращающий момент двигателя. Направление вращения может быть определено по правилу левой руки. Очевидно, что число оборотов ротора никогда не может при этом сделаться равным числу оборотов поля, т. к. тогда не было бы пересечения силовыми линиями проводников роторной обмотки и вращающий момент



Рис. 90.

был бы равен нулю. Такое синхронное вращение могло бы иметь место лишь в том случае, когда ротор при своем вращении не должен был бы преодолевать никаких внешних сопротивлений (трения, сопротивления воздуха) и если бы не существовало потерь на прохождение тока по проводникам. В действительности, даже при холостом ходе, когда полезная нагрузка двигателя равна нулю, эти потери существуют и поэтому скорость ротора даже при холостом ходе будет (хотя и незначительно) меньше скорости вращения поля. По тем же причинам скорость ротора не может быть и выше синхронной (т.е. скорости поля), если только ротор не вращается каким-либо посторонним двигателем, т.к. в этом случае пересечение силовых линий про-

исходило бы в обратном направлении, что, по правилу левой руки, создавало бы не вращающий, а тормозящий момент. Скорость вращения ротора определяется нагрузкой двигателя. Чем больше последняя, тем больший вращающий момент должен быть приложен к ротору, чтобы эту нагрузку преодолеть. В свою очередь величина вращающего момента пропорциональна произведению  $\Phi I_2$ , где  $\Phi$  — магнитный поток, а  $I_2$  — ток ротора. Т. к. при постоянном напряжении сети магнитный поток остается также почти постоянным, то увеличение момента может происходить лишь за счет увеличения роторного тока, величина которого зависит от скорости пересечения проводниками силовых линий поля. Для того, чтобы эта скорость увеличивалась, необходимо, чтобы ротор вращался медленнее. Регулирование скорости вращения и тока в роторе происходит автоматически. Если, напр., двигатель разгрузить, то величина вращающего момента станет слишком большой, и ротор начнет ускорять свой ход. При этом, однако, ток в его обмотке начнет уменьшаться, и увеличение скорости будет происходить лишь до тех пор, пока не установится вращающий момент, как раз необходимый для новой нагрузки. До сих пор мы предполагали, что вращающееся поле создается только статорной обмоткой. Такое положение отвечает действительности лишь в том случае, когда обмотка ротора разомкнута и двигатель неподвижен. При работе двигателя в обмотке его ротора протекают токи, которые сами создают (при многофазной обмотке) поле, вращающееся в ту же сторону, что и поле статора. По закону Ленца, эти поля направлены в противоположные стороны и, следовательно, ослабляют друг друга. Геометрическая разность этих полей и будет результирующим полем а. д. Это поле остается почти постоянным по величине, т. к. с увеличением нагрузки, т. е. тока в роторе, одновременно должна возрасти и мощность, поступающая из сети, т. е. ток статора. Другими словами, мы имеем здесь то же явление, что и в обычном трансформаторе.

*Скольжение.* Несмотря на то, что поля статора и ротора создаются обмотками неподвижной и вращающейся, их можно складывать геометрически, т. к. в пространстве поля вращаются с одной и той же скоростью, что становится понятным из следующих рассуждений. Если скорость вращения статорного поля составляет  $n_1$  оборотов в минуту и если число оборотов ротора равно  $n_2$ , то разность  $n_1 - n_2$ , отнесенная к числу оборотов статорного поля, называется *скольжением*. Т. обр., скольжение  $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ .

Очень часто скольжение выражают в процентах от синхронной скорости  $n_1$ , и тогда  $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%$ . Число периодов в сети, питающей двигатель, и число оборотов  $n_1$  связаны известным нам уравнением  $f_1 = \frac{pn_1}{60}$ . Аналогично, частота токов в роторе  $f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}$ . Т. к. из выражения для  $s$  следует, что  $n_1 - n_2 = sn_1$ , то, подставляя в формулу для  $f_2$ , получим  $f_2 = \frac{pn_1 s}{60} = f_1 s$ , т. е. частота тока в роторе равна частоте в статоре, умноженной на скольжение. Т. обр., созданное ротором вращающееся поле будет перемещаться относительно самого ротора со скоростью  $\frac{60 f_2}{p} = \frac{60 f_1 s}{p} = \frac{60 s}{p} \cdot \frac{pn_1}{60} = sn_1 = n_1 - n_2$  оборотов в минуту. Т. к., кроме того, сам ротор вращается с числом оборотов, равным  $n_2$ , то скорость вращения роторного поля относительно *неподвижного статора* будет  $n_1 - n_2 + n_2 = n_1$ , т. е. та же, что и статорного поля. Из уравнения для скольжения следует, что при неподвижном двигателе  $s = \frac{n_1 - 0}{n_1} = 1$ .

Если бы двигатель мог вращаться с синхронной скоростью ( $n_2 = n_1$ ), то мы имели бы  $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0$ .

*Вращающий момент.* При вращении ротора в его обмотке наводится магнитным потоком эдс, устанавливающая ток. Если скорость ротора близка



к синхронной, т. е. двигатель идет вхолостую или нагружен очень слабо, то скольжение будет небольшим, и частота тока в роторе тоже будет невелика. Т. к. индуктивное сопротивление обмотки тем больше, чем больше частота проходящего по ней тока, то при слабых нагрузках индуктивное сопротивление будет весьма мало по сравнению с омическим, и ток будет почти в фазе с вызывающей его эдс. При нагрузке двигателя скольжение увеличивается, частота тока, а с ней и индуктивное сопротивление также растут, и ток начинает отставать от эдс. Вследствие этого не все провода ротора, находящиеся под определенным полюсом, обтекаются током одного направления. При этом часть проводов, взаимодействуя с потоком, по правилу левой руки, создает положительный момент, тогда как другая часть, обтекаемая током противоположного направления, создает отрицательный (тормозящий) момент. В результате общий момент уменьшается. Если при неподвижном двигателе (когда скольжение, а следовательно и частота имеют наибольшее значение) омическое сопротивление будет по сравнению с индуктивным очень невелико, то и вращающий момент (называемый при неподвижном двигателе начальным моментом) может оказаться слишком малым. Чтобы его увеличить, нужно увеличить омическое сопротивление ротора, что, однако, вследствие возрастания потерь уменьшит к. п. д. машины. Если ротор имеет трехфазную обмотку, то ее концы можно вывести к кольцам, и тогда мы получим возможность включать на время пуска в цепь ротора добавочное сопротивление в виде резистора и тем повысить начальный момент двигателя. Изменение величины момента от скольжения (т. е. от скорости) показано на рис. 91 (кривая 1). При заворачивании двигателя (уменьшение  $s$ ) момент вследствие уменьшения индуктивного сопротивления увеличивается, пока не достигнет в точке  $A$  максимального значения. При дальнейшем увеличении скорости число перерезываемых силовых линий, а, след., и сила тока начинают уменьшаться, что момент начинает падать

и при синхронизме, когда  $s = 0$  (если бы такая скорость была возможна), он делается равным нулю. При увеличении сопротивления ротора максимум момента перемещается в сторону больших скольжений (см. кривые  $3R_2$ ,  $5,5R_2$  на рис. 91). При еще большем увеличении сопротивления (напр., для машины, соответствующей чертежу 91 при увеличении сопротивления в 8,5 раз) максимум момента перемещается

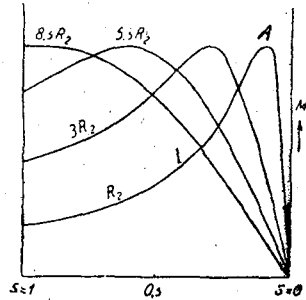


Рис. 91.

в точку, соответствующую скольжению  $s = 1$ , т. е. начальный и максимальный моменты совпадают. Отметим, что, увеличивая сопротивление ротора, мы лишь перемещаем максимум момента, не изменяя его абсолютной величины. Мощность, передаваемая ротору вращающимся полем  $W_1 = \omega_1 M$ , где  $\omega_1$  — угловая скорость вращения поля. Т. к. угловая скорость вращения ротора меньше, чем  $\omega_1$ , то обозначая ее через  $\omega_2$ , мы найдем, что механическая мощность ротора составляет  $W_2 = \omega_2 M$ . Разность между этими мощностями теряется в роторе и выделяется в виде тепла. Эта разность составляет

$$W = W_1 - W_2 = M(\omega_1 - \omega_2) = M\omega_1 \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = W \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}$$

Т. к. вообще  $\omega = 2\pi n$ , то

$$W = W_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1} = W_1 s$$

Отсюда следует, что электрические потери в роторе пропорциональны скольжению, и поэтому на практике так рассчитывают а. д., чтобы скольжение было наименьшим. Обычно скольжение  $s$  составляет при полной нагрузке лишь несколько %.

Диаграмма а. д. Выше мы указывали, что работа а. д. может быть



и состоящая из последовательно соединенных пяти сопротивлений (двух индуктивных  $x_1$  и  $x'_2$ , двух постоянных омических  $r_1$  и  $r'_2$  и одного переменного омического  $r'_2 \frac{1-s}{s}$ ) и ответвления  $x_0, r_0$ , через которое проходит

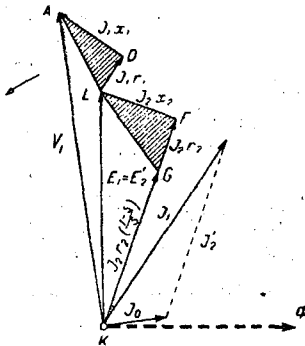


Рис. 93.

ток  $I_0$  (аналогичный току холостого хода а. д.). Т. обр. с помощью этой схемы (т. н. схемы замещения) могут быть изучены все явления, происходящие в а. д., и законы их изменения.

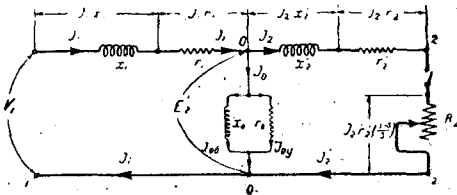


Рис. 94.

Для такой схемы, а следовательно и для а. д. (см. *теоретические основы электротехники*) существует круговая диаграмма, т. е. при изменении нагрузки (сопротивления  $r'_2 \frac{1-s}{s}$ ) конец вектора тока перемещается по окружности. Можно без значительного ущерба точности упростить схему рис. 121, перенести ветвь 0—0 (т. н. ветвь холостого хода) на зажимы сети. При этом пренебрегаем падением напряжения на сопротивлениях  $x_1$  и  $r_1$  (т. е. падением в статора), которое, вообще говоря, весьма невелико. Эта упрощенная схема показана на рис. 95, и для нее круговая диаграмма строится очень просто. Если сперва считать, что ру-

билыник I разомкнут, то круговая диаграмма получит вид, показанный на рис. 96. Здесь отрезок AB, равный  $I'_2(x_1 + x'_2)$ , пропорционален току ротора и в некотором масштабе может

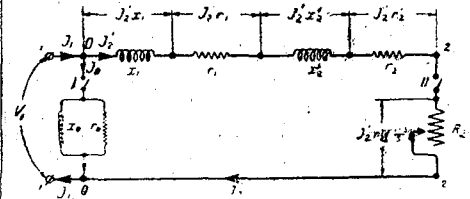


Рис. 95.

быть ему приравнен. При увеличении нагрузки, т. е. увеличении  $s$ , отрезок  $GK = I'_2 r'_2 \frac{1-s}{s}$  уменьшается, и точка B перемещается по окружности вправо. При  $s=1$  (двигатель неподвижен)  $GK=0$ , и ток

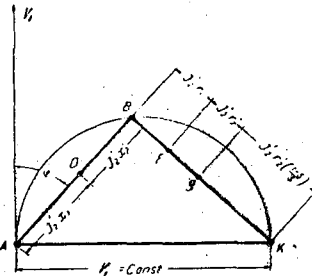


Рис. 96.

приходит в точку  $B_K$  (рис. 97). Это—максимальное значение тока в роторе, называемое током короткого замыкания. На диаграмме рис. 95 этот режим

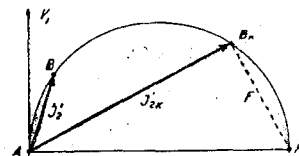


Рис. 97.

характеризуется замыканием накоротко переменного сопротивления  $r'_2 \frac{1-s}{s}$ . При холостом ходе ( $s \approx 0$ ) отрезок GK становится бесконечно большим по сравнению с другими падениями напряжения, и ток в роторе

становится равным нулю (приходит в точку *A*, рис. 97). Этот режим получается при размыкании рубильника II на рис. 95. Ток статора определяется уравнением  $\vec{I}_1 = \vec{I}_2 + \vec{I}_0$  и при холостом ходе равен  $I_0$  (рубильник II разомкнут, рубильник I замкнут). Если пристроить на диаграмме вектор  $I_0$  (по величине и по фазе) так, чтобы его конец попал в точку *A* (рис. 98), то для какого-либо значения роторного

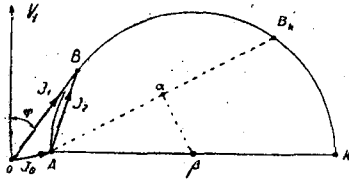


Рис. 98.

тока *AB* статорный ток будет изображаться вектором *OB*. Самое построение диаграммы производится с помощью данных, полученных из опытов холостого хода и короткого замыкания. При опыте холостого хода двигатель заставляют вращаться ненагруженным и определяют ток холостого хода  $I_0$  и его фазу, т.е.  $\cos \varphi$ . При опыте короткого замыкания определяют соответственно  $I_k$  и  $\cos \varphi_k$ . Затем произвольно выбранной точки *O* (рис. 99) откладывают по величине и

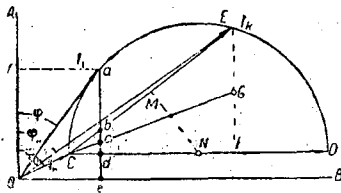


Рис. 99.

по фазе токи  $I_0$  и  $I_k$ , соединяют их концы линией *CE* и из середины этой линии (точка *M*) проводят перпендикуляр *MN* до пересечения с линией *CD*, параллельной *OB* и проходящей через конец *C* вектора  $I_0$ . Далее, на линии *EF* (перпендикулярной к *CD*) отыскивают точку *G*, так, чтобы  $\frac{EG}{GF} = \frac{r_1'}{r_1}$ , и проводят линию *CG*. Построив круговую диаграмму, можно для любого тока двигателя определить

все величины, характеризующие его работу при этом токе. Напр., для произвольного тока *Oa*:

полезная мощность	определяется отрезком	<i>ae</i>
вращающий момент	"	<i>ab</i>
скольжение	"	<i>ac</i>
	отношением	$\frac{bc}{ac}$
к. п. д.	"	$\frac{ab}{ae}$
$\cos \varphi$	"	$\frac{Of}{Oa}$

Если определить эти величины для нескольких значений  $I_1$  и построить кривые их изменения в зависимости от полезной мощности двигателя (т. н. рабочие кривые), то получится весьма наглядная картина работы двигателя при различных нагрузках. На рис. 100

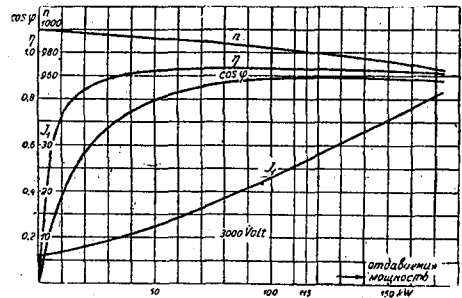


Рис. 100.

показаны, напр., рабочие кривые а. д. на 115 квт, 3.000 вольт, 980 об./мин.

**Пуск в ход и регулирование скорости.**  
Если неподвижный еще двигатель присоединить к полному напряжению сети, то в его обмотку бросится большой ток (в 8—10 раз ббльший нормального), могущий сжечь обмотку и испортить машину. Кроме того, если мощность двигателя велика, толчек тока вызовет колебания напряжения сети. Поэтому пускать непосредственно от полного напряжения сети можно лишь небольшие машины мощностью до 5 л. с. Обмотка роторов этих двигателей выполняется короткозамкнутой в виде беличьего колеса и рассчитывается так, чтобы пусковой ток не превосходил нормальный больше, чем в 4—5 раз. Для пуска двигателей большой мощности приходится применять особые приспособления, действие которых основано либо на понижении напря-

жения сети, либо на временном увеличении сопротивления ротора. В первом случае пользуются или сопротивлениями, или т-ром. Пуск с помощью сопротивления показан на верхнем чертеже рис. 101. В начале пуска ползушки устанавливаются в крайнее правое положение, и тогда напряжение уменьшается на величину  $IR$ , где  $I$  — ток, поступающий из сети, а  $R$  — сопротивление реостата. По мере разворачивания сопротивление постепенно уменьшается и по достижении полного числа оборотов ползушки ставят в крайнее левое положение, т. е. выключают все сопротивление. Неэкономичность этого способа (большой расход мощности в сопротивлении) привела к применению регулирующегося т-ра (или автотрансформатора), т. к. собственное потребление т-ра весьма не велико (верхний чертеж рис. 101). Если наружу выведены все 6 концов статорной обмотки и нормально работа двигателя происходит при соединении треугольником, то можно добиться уменьшения пускового тока приблизительно в 3 раза путем пуска при соединении в звезду и последующего переключения на треугольник. Схема такого переключателя показана на рис. 102. Описанные способы понижения напряжения применяются лишь для тех двигателей, у которых роторная обмотка соединена накоротко внутри машины, т. е. гл. обр. для двигателей с ротором в виде беличьего колеса. Для этих же двигателей предложено ряд конструкций (двигатели Духового, двигатели с глубокими впадинами и др.), в которых пуск в ход совершается без понижения напряжения путем особого устройства обмоток. Если роторная обмотка имеет выведенные наружу концы, присоединен-

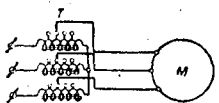
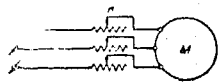


Рис. 101.

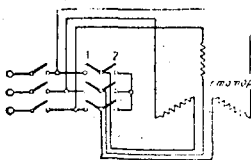


Рис. 102.

ные к кольцам, то пуск двигателей осуществляется с помощью включения сопротивлений в цепь ротора (рис. 103). Здесь в момент включения ползушки устанавливаются в крайнее левое положение и по мере разворачивания постепенно передвигаются вправо, пока, по достижении полной скорости, все сопротивление окажется выключенным, и обмотка ротора замкнутой накоротко. Этот способ имеет еще то преимущество, что при нем повышается начальный момент (см. выше), тогда как при

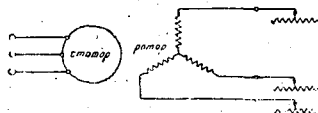


Рис. 103

понижении напряжения он резко уменьшается. А. д. принадлежит к числу машин, число оборотов которых мало зависит от нагрузки. Если все же регулирование скорости необходимо, то его можно осуществить введением сопротивлений в цепь ротора, т. к. при этом потери, а след. и скольжение должны увеличиться. Этот способ, однако, неэкономичен из-за больших потерь энергии в реостате. Можно путем усложнения схемы (введением лишних машин) использовать эту „энергию скольжения“, как это делается в каскадных соединениях (см. ниже). Наконец, регулировку скорости можно осуществить, применяя особую сконструированную обмотку статора, могущую переключаться на различное число полюсов. Этот способ хотя и экономичен, но не является во многих случаях целесообразным, т. к. не дает плавного изменения скорости.

**Однофазный а. д.** При питании однофазной обмотки однофазным током возникает пульсирующее поле, взаимодействие которого с проводниками неподвижного ротора не дает определенно направленного вращающего момента. Иначе обстоит дело, если ротор однофазного а. д. предварительно развернуть каким-либо образом до скорости, близкой к синхронной. Как указывалось выше, всякое пульсирующее поле можно разложить на два вращающихся в разные стороны поля половинной ве-

двигателя

личины. Поэтому если ротор приведен во вращение, то на него будет действовать постоянный вращающий момент от поля, вращающегося в ту же сторону. Обратное поле будет стремиться затормозить ротор, но т. к. пересечение проводников с этим обратным полем происходит весьма быстро (скольжение по отношению к этому полю при нормальной скорости составляет около 200%), то индуктивное сопротивление здесь сильно возрастает и индуктированные этим полем токи будут сдвинуты по фазе от эдс почти на 90°, что вызовет сильное уменьшение тормозящего момента (при полной скорости он почти равен нулю). Т. к. мдс статора должна создавать оба поля, то потребление намагничивающего (реактивного) тока здесь значительно больше, чем у трехфазного двигателя той же мощности, что приводит к более низкому коэффициенту мощности ( $\cos \varphi$ ). Так как однофазный двигатель не развивает начального момента, то для пуска его в ход приходится применять особые приспособления, одно из которых показано на

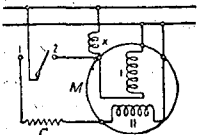


Рис. 104.

рис. 104. Здесь на статоре, кроме главной обмотки (I), уложена еще вторая — пусковая (II). При пуске последовательно с главной обмоткой включается индуктивное сопротивление ( $x$ ), а последовательно с пусковой — омическое сопротивление ( $r$ ). При установке переключателя в положение 1 обе обмотки включены параллельно, и токи в них благодаря наличию сопротивлений  $x$  и  $r$  сдвигаются по фазе, а т. к., кроме того, самые обмотки сдвинуты в пространстве, то образуется вращающееся поле, приводящее ротор во вращение. При достижении нормальной скорости переключатель ставится в положение 2, при чем сопротивление  $x$  и пусковая обмотка (вместе с сопротивлением  $r$ ) оказываются отключенными от сети, и машина начинает работать как нормальный однофазный двигатель.

**Асинхронный генератор.** Если присоединенный к сети а. д. заставить с помощью какого-либо постороннего

двигателя вращаться со скоростью выше синхронной, то фаза эдс, а след. и тока, изменит свое направление на обратное, и машина начнет отдавать энергию в сеть, т. е. превратится в генератор. Несмотря на простоту устройства и эксплуатации, асинхронные генераторы получили пока лишь ограниченное применение, т. к. для возможности работы они должны возбуждаться от сети, к которой они присоединены, т. е. сеть должна питаться еще другими синхронными генераторами. Другими словами, асинхронный генератор не обладает свойством самовозбуждения.

**Конструкции а. д.** На рис. 105 показан разрез, а на рис. 106 — детали

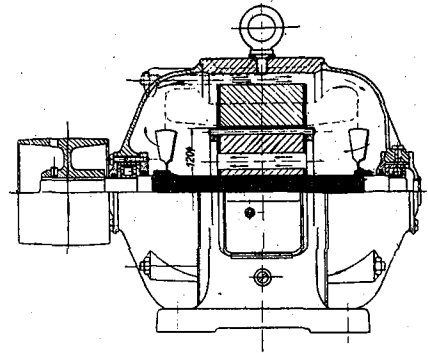


Рис. 105.

а. д. с короткозамкнутым ротором мощностью 0,9 квт, 2,925 об./мин. На рис. 106 внизу слева лежит ротор с обмоткой в виде беличьего колеса и

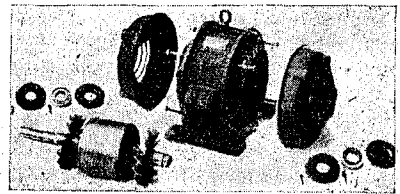


Рис. 106.

двумя вентиляторами для охлаждения машины. Середину чертежа занимает статор и два боковых (подшипниковых) щита. По бокам лежат детали шарикоподшипников. На рис. 107 показан разрез, а на рис. 108 — внешний вид двигателя с кольцами мощностью 4,8 квт,

1.440 об./мин. Справа видны три кольца, к которым присоединена обмотка

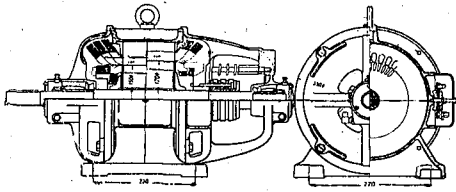


Рис. 107.

ротора и которые служат для присоединения реостата. Оба двигателя рас-

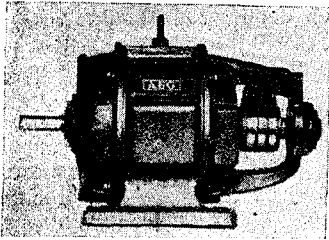


Рис. 108.

считаны на напряжение 380 вольт. На рис. 109 показан мощный двигатель для прокатного стана. Его данные: мощность 1.250 квт,  $n \cong 600$  об./мин.

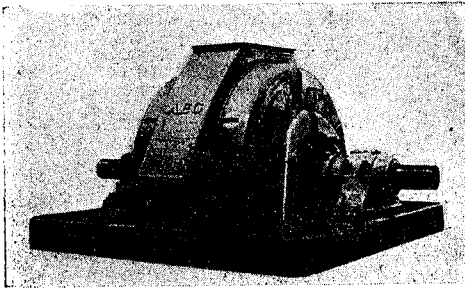


Рис. 109.

**Синхронные машины (с. м.). Реакция якоря.** До тех пор, пока с. м. работает без нагрузки, по обмотке ее якоря (статора) ток либо не проходит совсем (в случае генератора), либо (в случае двигателя) он имеет весьма малую величину по сравнению с током нормальной нагрузки, и его влиянием можно пренебрегать. Такое состояние называется холостым ходом машины.

Т. о., при холостом ходе с. м. магнитный поток, индуктирующий эдс статора, создается исключительно мдс ротора. При нагрузке, благодаря прохождению тока через проводники статорной обмотки, последняя в свою очередь создает магнитное поле, которое, в случае трехфазной машины, вращается в пространстве с синхронной скоростью, т. е. с той же скоростью, с которой вращается и ротор. В случае однофазной машины пульсирующее поле статора можно разложить на два вращающихся в разные стороны, при чем можно учитывать только влияние прямого поля, т. к. инверсное почти целиком уничтожается. Поля ротора и статора, складываясь геометрически, дают некоторое результирующее поле при нагрузке, которая и индуктирует действительную эдс машины. При учете действия реакции якоря необходимо рассматривать отдельно машины с выступающими полюсами и машины с неявно выраженными полюсами, т. к. магнитные сопротивления воздушного промежутка будут в этих случаях различны. Рассмотрим сперва машину с выступающими полюсами. Допустим сперва, что эдс индуктируемая в обмотке статора роторным (основным) полем, и ток статора совпадают по фазе (внутренний сдвиг фаз равен нулю). Тогда максимум тока в какой-либо катушке статора будет иметь место в тот момент, когда поток, сцепленный с этой катушкой, равен нулю (т. к. эдс отстает от потока на  $90^\circ$ ), т. е. амплитуда

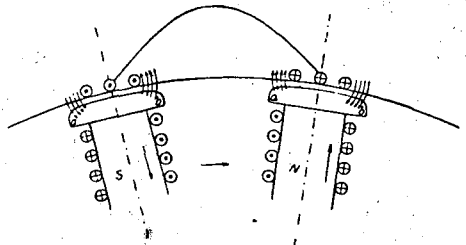


Рис. 110.

синусоиды мдс статора будет расположена над серединой катушки или междуполюсного пространства (рис. 110). Из чертежа легко видеть, что при этом поток статора под одной

половиной полюса будет складываться с основным потоком машины, а под другой половиной полюса — вычитаться. Здесь, след., получается то же перекашивание поля, которое имело место и при поперечной реакции якоря в машинах постоянного тока. Т. к. мдс статора, действующая на обе половины полюса, равны, то вследствие насыщения железа увеличение потоков в одной половине будет меньше, чем уменьшение в другой половине, и результирующий поток будет несколько меньше, чем поток при холостом ходе. Рассмотрим теперь случай, когда ток в статоре отстает от эдс основного поля на  $90^\circ$ . Легко понять, что здесь волна мдс будет по сравнению с предыдущим чертежом сдвинута на  $90^\circ$  в сторону отставания и, как видно из рис. 111, поле статора будет размагничивать машину, т. е. уменьшать поток

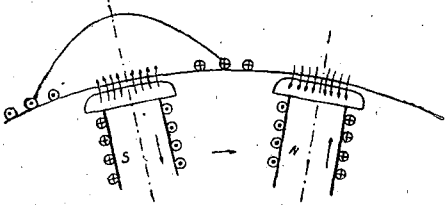


Рис. 111.

холостого хода (силовые линии поля якоря направлены противоположно линиям основного поля). Здесь получается явление, аналогичное продольной реакции якоря машин постоянного тока. При опережении током статора эдс от основного поля на  $90^\circ$  волна мдс статора по сравнению с рис. 110 сдвигается на  $90^\circ$  в сторону опережения (рис. 112), и поле статора будет уси-

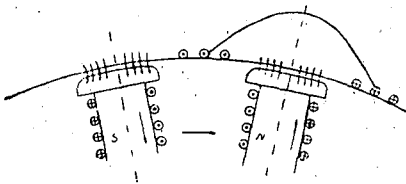


Рис. 112.

ливать основное поле машины. Найденные соотношения справедливы для генераторов. Для двигателей они бу-

дут обратными, т. е. при отставании тока будет иметь место усиление основного поля, а при опережении — ослабление. В этом легко убедиться, если на рис. 111 и 112 изменить направления токов в статоре на обратные. В промежуточных случаях, т. е. при сдвигах между током и эдс  $> 0$ , но  $< 90^\circ$ , волна мдс статора будет занимать промежуточное между рис. 110 и 111 положение. Однако, ее можно всегда разложить на две составляющих, у одной из которых амплитуда расположена под серединой междуполюсного пространства (поперечная мдс), а у другой — под серединой полюса (продольная мдс). Так как у машин с выступающими полюсами магнитные сопротивления для поперечного и продольного полей различны (первое обусловлено почти исключительно междуполюсным промежутком и не зависит от насыщения, а второе, заключающееся в железе, сильно зависит от насыщения), то учет действия реакции статора в этих машинах производится отдельно для поперечного и продольного полей (см. ниже). В машинах с неясно выраженными полюсами распределение мдс остается, разумеется, тем же, но, т. к. благодаря одинаковости воздушного промежутка магнитное сопротивление для обоих потоков одинаково, то при учете действия реакции якоря уже нет смысла делить потоки на продольные и поперечные и можно оперировать с суммарным полем статора.

**Диаграммы.** Если бы в работающей с. м. отсутствовала реакция якоря и не имели бы место омическое и индуктивное (от рассеяния) падения напряжения, то напряжение на зажимах было бы равно эдс машины. На практике такой случай имеет место лишь при холостом ходе. При нагрузке появляются оба падения напряжения, и, кроме того, результирующий поток будет здесь отличаться на величину потока реакции якоря от поля холостого хода. Влияние реакции якоря можно учесть еще и иначе, а именно предположив, что поле реакции якоря как бы самостоятельно наводит в статорной обмотке эдс самоиндукции, которая вычитается геометрически из эдс



холостого хода, в результате чего остается действительная эдс машины при нагрузке. Весьма наглядной является при этом графическая интерпретация всех описанных явлений с помощью диаграмм.

а) *Диаграмма машины с выступающими полюсами.* На рис. 113 по вертикали отложен вектор статорного тока

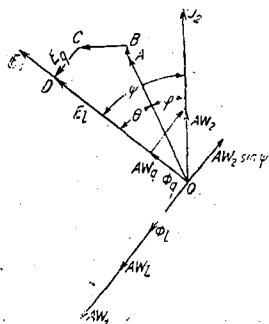


Рис. 113.

$I_2$ . В фазе с  $I_2$  находятся ампер-витки реакции статора  $AW_2$ , которые мы раскладываем на поперечные ампер-витки  $AW_q = AW_2 \cos \psi$  и продольные  $AW_2 \sin \psi$ . Здесь  $\psi$  — угол между током  $I_2$  и эдс  $E_1$ , создаваемой потоком холостого хода  $\Phi$ , в свою очередь вызываемым ампер-витками ротора  $AW_1$ . Продольные ампер-витки создают поток, индуктирующий в статоре „продольную эдс“, отстающую от  $AW_2 \sin \psi$  на  $90^\circ$  и численно равную отрезку  $E_1 D$ . Вычитая из  $E_1$  отрезок  $E_1 D$ , мы получаем эдс  $E_e = OD$ . Поперечные ампер-витки индуктируют „поперечную эдс“, отстающую на  $90^\circ$  от  $AW_2$  и равную  $E_q = DC$ . Вычитая из  $E_e$  эдс  $E_q$ , мы получим отрезок  $OC$ , равный действительной эдс машины  $E$ . Напряжение на зажимах  $OA$  отличается от  $E$  на величину индуктивного падения напряжения  $CB$  (под углом  $90^\circ$  к току) и омического падения напряжения  $AB$  (в фазе с током). Угол  $\psi$  между  $E_1$  и  $U$  называется углом внутреннего сдвига фаз, а угол  $\varphi$  между  $AB$  и  $I_2$  — углом внешнего сдвига фаз. Как видно из чертежа, диаграмма построена для некоторой индуктивной нагрузки. Описанная диаграмма в литературе носит название диаграммы Blondela—Ар-

нольда—Лякура или сокращенно ВАС (Blondel—Arnold—la Cour).

б) *Диаграмма для машины с неясно выраженными полюсами* (диаграмма Потье) показана на рис. 114. Здесь снова по вертикали отложен ток  $I_2$  и в фазе с ним ампер-витки реакции якоря  $AW_2$ . В этом случае уже нет необходимости рассматривать отдельно продольные и поперечные поля реакции якоря. Результирующие ампер-витки  $AW_2$ , создающие действительный поток машины  $\Phi$ , индуктирующий действительную эдс  $E = OC$ , получаются путем геометрического вычитания  $AW_2$  (или сложения  $-AW_2$ ) из основных ампер-витков  $AW_1$ . Вычитая из  $E$  индуктивное  $(CB)$  и омическое  $(AB)$  падения напряжения, получим напряжение на зажимах  $V$ .  $E_1$  указывает направление эдс, индуктированной при холостом ходе мдс  $AW_1$ . В виду того, что для построения диаграммы ВАС требуется знание угла  $\psi$  и определение его сопряжено с необходимостью добавочных вычислений и построений, часто диаграммой Потье пользуются и для машин с выступающими полюсами. Получающаяся при этом ошибка заметна при коэффициентах мощности, близких к 1, но, уже начиная с  $\cos \varphi = 0,8$  и меньше, результаты получаются достаточно близкими к действительности. Для быстрых подсчетов и для выявления основных процессов, происходящих в синхронных машинах, можно еще больше упростить диаграмму, как было сделано Бен-Эшенбургом. В диаграмме  $BE$  машина предположена ненасыщенной, и тогда действие реакции якоря можно заменить некоторым фиктивным индуктивным падением напряжения  $Ix$ , вектор которого перпендикулярен к вектору тока. Следовательно, диаграмма  $BE$  строится в предположении, что в машине имеется лишь индуктивное падение напряжения  $I(x_s + x) = Ix_a$  и омическое падение

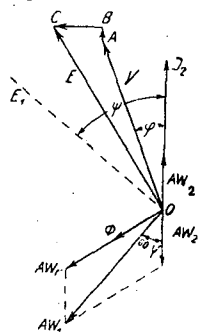


Рис. 114.

напряжения  $I r_a$ . Сопротивление  $x_a$ , включающее в себя как  $x_s$  (от рассеяния), так и  $x$  (от реакции якоря), называется полным синхронным реактивным сопротивлением. Кроме того, в большинстве практических случаев омическим падением напряжения  $I r_a$ , по сравнению с  $I x_a$ , можно пренебречь,

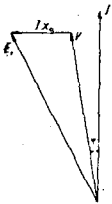


Рис. 115.

и тогда диаграмма приобретает весьма простой вид, показанный на рис. 115.

**Короткое замыкание с. м.** Если у вращающейся, но невозбужденной с. м. замкнуть внешние зажимы накоротко (с помощью амперметра) и начать постепенно повышать возбуждение, то можно построить характеристику короткого замыкания, т. е. зависимость между током машины и ампер-витками или током возбуждения. Короткое замыкание с. м. соответствует нагрузке чисто индуктивным сопротивлением, т. к. омическое сопротивление обмотки статора мало по сравнению с индуктивным. Величина тока короткого замыкания  $I_{2k} \cong \frac{E_1}{x_a}$ . Внешнее напряже-

ние равно при этом нулю. Т. к. при коротком замыкании основной поток очень мал (чтобы установить в сопротивлении  $x_a$  эдс  $E_1$  требуется небольшая мдс), то при этом режиме железо машины далеко от насыщения, и поэтому характеристика короткого замыкания представляет собой прямую линию. На рис. 116 показаны характери-

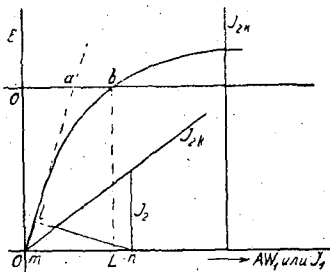


Рис. 116.

стики холостого хода и короткого замыкания с. м. Если для какого-либо тока  $I_{2k} = I_2$  найти ампер-витки возбужде-

ния  $On$  и, кроме того, определить по х-ке холостого хода ампер-витки возбуждения  $Om$ , необходимые для создания падения напряжения от рассеяния  $I_{2k} x_s = ml$ , то получается характеристичный треугольник (треугольник Потье)  $Om$ , у которого высота  $lm = I_{2k} x_s$ ; основание  $On$  — полному числу ампер-витков, необходимых для установления тока короткого замыкания  $I_{2k} = I_2$ , отрезок  $Om$  — ампер-витки, потребные для покрытия индуктивного падения напряжения  $I_{2k} x_s$ , и отрезок  $mn$  — ампер-витки для компенсации реакции якоря  $I_{2k} x$ . Треугольником Потье очень удобно пользоваться на практике для построения внешней характеристики, т. е. зависимости напряжения от нагрузки. На том же чертеже показано влияние насыщения машины на форму х-ки холостого хода. Если  $OQ$  изображает нормальное напряжение машины, то число ампер-витков возбуждения должно быть равно  $OL = Qb$ . Из них часть  $Qa$  расходуется на воздушный промежуток, а часть  $ab$  — на железо. Совершенно иной характер будет иметь короткое замыкание машины, если его произвести внезапно при полном возбуждении. При этом возникает значительный толчок тока (по нормам этот толчок допускается до 15-кратной амплитуды нормального тока), и появляются значительные механические силы, которые при недостаточно прочной конструкции могут вывести машину из строя.

**Параллельная работа с. м.** Для возможности параллельной работы с. м. на общую сеть должны быть при включении выполнены следующие условия: равенство напряжений присоединяемой машины и уже работающей, одинаковость фаз напряжений и равенство частот. Последнее условие приводит к требованию, чтобы числа оборотов обеих машин были равны, если числа полюсов одинаковы, или находились бы в обратном отношении к числам полюсов. На рис. 117 однофазная машина I работает на некоторую внешнюю сеть 1, 2. Пусть напряжение на зажимах этой машины будет  $V_1$ . Пусть, далее машина II приведена во вращение

с такой скоростью, что частота и фаза напряжения ее те же, что и у машины I, но напряжение ее  $V_2$  несколько меньше, чем  $V_1$ . Кроме того, здесь, как и в машинах постоянного тока, напряжения обоих генераторов должны быть направлены в противоположные стороны, т. е. как показано на рис. 117 стрелками.

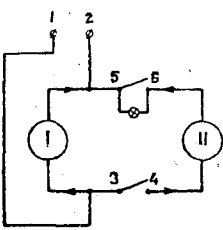


Рис. 117.

Если теперь замкнуть рубильник 3, 4, то между точками 5, 6 будет иметь место разность напряжений  $v = V_1 - V_2$ , которую можно обнаружить, если к точкам 5 и 6 присоединить лампу или вольтметр. При замыкании рубильника 5, 6 напряжение  $v$  установит в цепи обоих генераторов (если пренебречь их омическими сопро-

тивлениями) ток  $i = \frac{v}{x_{a1} + x_{a2}}$ . Будучи чисто реактивным, этот ток отстает от вызывающего его напряжения  $v$  на  $90^\circ$  (рис. 118). Из чертежа видно, что ток  $i$  для машины I будет отстающим, а для машины II опережающим, благодаря чему вызванная им реакция якоря несколько размагнитит генератор I и подмагнитит генератор II. В результате на зажимах внешней цепи, т. е. между точками 1, 2, установится некоторое среднее напряжение  $V$ , при чем  $V_1 > V > V_2$ . При достаточно большой разнице между  $V_1$  и  $V_2$  ток  $i$  может достигнуть значения,

Рис. 118.

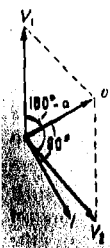


Рис. 118.

показанная на рис. 119. Замыкая рубильник 3, 4 (рис. 117), мы получим между токами напряжени

$V_1$  и  $V_2$ . В этом случае при замыкании рубильника 5, 6 уравнительный ток  $i$ , сдвинутый на  $90^\circ$  от  $v$ , оказывается почти в фазе с  $V_2$  и, следовательно, будучи для него током нагрузки, этот ток заставит ротор генератора II несколько затормозиться. По отношению к напряжению  $V_1$  генератора I этот ток сдвинут почти на  $180^\circ$  и, следовательно, будучи током двигателем, несколько подгонит его ротор. По истечении некоторого промежутка времени ток  $i$  выравнивает положение обоих роторов, и оба они начнут вращаться синхронно и притом так, что угол между  $V_1$  и  $V_2$  станет равен  $180^\circ$ . Однако, включать генераторы на параллельную работу при неодинаковости фаз напряжений нельзя, так как возникающие при этом механические усилия могут вызвать порчу генераторов и их первичных двигателей. Если напряжения генераторов равны,

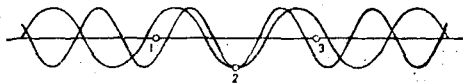


Рис. 120.

но частоты их различны, то при замыкании рубильника 3, 4 лампа или вольтметр, помещенные между зажимами 5, 6, будут испытывать непрерывные колебания напряжения. На рис. 120 построены синусоиды напряжений обоих генераторов с отличающейся друг от друга частотой. Очевидно, что в точках 1 и 3 результирующее напряжение  $v = 0$ , а в точке 2 оно вдвое больше напряжений каждого генератора. Если частоты обоих генераторов отличаются лишь незначительно, то период затухания и вспыхивания лампы будет большим, и легко уловить момент, когда  $v = 0$ . Если в этот момент включить рубильник 5, 6, тонякакого выравнивающего тока не появится, и в дальнейшем генераторы пойдут синхронно. Т. о. лампа или вольтметр могут служить указателями правильного момента включения. После правильного включения присоединенная машина находится в состоянии электрического равновесия, т. е. она не отдает и не потребляет тока. Для того, чтобы нагрузить ее возбуждение, т. к. повы-

шение напряжения поведет лишь, как было выяснено выше, к появлению реактивного тока, но не создаст активного тока, могущего совершать работу. Единственным средством нагрузить машины является увеличение вращающего момента ее первичного двигателя, т. е. при этом ротор получит стремление забегать вперед, а это, как мы видим (рис. 119), сейчас же вызовет появление активного тока нагрузки. Все изложенное справедливо и для трехфазных машин, но подготовка машины к включению, т. н. синхронизация, обставлена здесь несколько иначе. На рис. 121 машина I работает на некоторую сеть. Для синхронизации машины II можно воспользоваться тремя

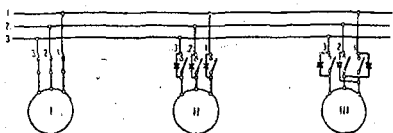


Рис. 121.

лампами, включенными между жилами отдельных фаз. Здесь все лампы загораются и потухают одновременно (если этого нет, то фазы машины присоединены неправильно), и включение происходит, как и для однофазной машины, в тот момент, когда все лампы потухнут. Более распространенным является другой способ присоединения лампы, показанный у генератора III, когда одна лампа присоединена обоими полюсами к одной и той же фазе, а две другие — к различным. Очевидно, что включение должно происходить здесь в тот момент, когда первая лампа потухнет, а две другие будут гореть полным накалом. Этот способ имеет то преимущество, что по порядку потухания ламп можно судить о слишком быстром или слишком медленном вращении синхронизируемой машины. Выше мы указывали, что для нагрузки параллельно работающего генератора необходимо увеличить вращающий момент в его первичном двигателе, т. е. при этом между напряжениями машин, а также между их роторами, возникает расхождение на некоторый угол, вызывающее появление активных токов в статорах машин. В результате по-

является сила, стремящаяся выравнять положение роторов, т. е. привести векторы напряжений снова к углу в  $180^\circ$ . Эту силу называют синхронизирующей. Действие ее оказывается, однако, в силу механической инерции вращающихся частей, не постепенным, а колебательным. Когда угол между роторами (напр., вследствие разгрузки машины) сделается равным нулю, ротор под влиянием инерции несколько перейдет за это значение, и действие синхронизирующей силы сейчас же станет обратным, т. е. ротор снова получит стремление вернуться к нулевому положению, но опять вследствие инерции перейдет за него и т. д. Мы получаем здесь полную аналогию с маятником, качания которого постепенно затухают. Указанные колебания, возникающие при всяком изменении мощности и заставляющие ротор не сразу остановиться в положении, соответствующем данной нагрузке, присущи самой машине и зависят исключительно от ее индивидуальных свойств, благодаря чему их называют собственными колебаниями. Однако, существуют еще вынужденные колебания, вызываемые неравномерностью хода поршневых первичных двигателей. Если периоды собственных и вынужденных колебаний одинаковы, то наступает явление резонанса, при котором появляются столь значительные увеличения амплитуды качания, что параллельная работа машин становится невозможной. Выше мы видели, что, изменяя только возбуждение машины, мы не можем воздействовать на степень ее загрузки, т. е. не можем вызвать в ее статоре активный ток. В якоре появляется лишь реактивный ток, отстающий (при перевозбуждении генератора) или опережающий (при недозавоуждении). Т. е. мощность, отдаваемая генератором, при этом не изменяется, но общий ток растет лишь за счет реактивной составляющей. Если откладывать по оси абсцисс токи возбуждения или соответствующие им эдс  $E_1$ , а по оси ординат — токи статора, то связь между ними выразится в виде кривой, имеющей форму буквы V, — т. наз. V-образной кривой, или кривой Мордея. Чем меньше полное синхронное реактивное

сопротивление  $x_a$ , тем острее кривая, т. е. тем резче происходит изменение тока в статоре при изменении возбуждения. На рис. 122 показаны V-образные кривые для трех машин, у которых  $x_a$  относятся как  $1/4 : 1/2 : 1$ . Машины с очень

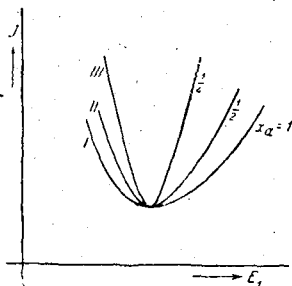


Рис. 122.

острыми кривыми меньше подходят для параллельной работы, и поэтому значение  $x_a$  не должно быть меньше известных пределов. С точки зрения использования машины ее следует возбуждать так, чтобы ток в статоре был наименьшим. Это имеет место в нижней части кривой, когда весь ток является активным и  $\cos \varphi = 1$ .

**Синхронный двигатель.** Если уменьшать вращающий момент первичного двигателя, приводящего во вращение параллельно работающий генератор, то ротор будет стремиться отстать на некоторый угол. Благодаря этому между напряжениями появится такой сдвиг фаз, что вызванный разностью напряжений ток будет стремиться поддерживать вращение машины, т. е. будет направлен по отношению к эдс отстающего генератора на угол больший  $90^\circ$ . Этот ток доставляется сетью, и продолжение его не прекращается и после полной остановки первичного двигателя, вращающего данную машину. Т. о. наша машина превращается в электродвигатель. При механической нагрузке угол расхождения векторов напряжения сети и эдс машины увеличивается еще больше и вместе с тем увеличивается угол и поступление тока (и мощности) из сети. Диаграмма синхронного двигателя показана на рис. 123. Вектор напряжения сети  $V_1$  направлен по вертикали. Эдс двигателя  $E_1$  является замыкающей стороной векторов напря-

жения  $V_1$  (равного и противоположного  $V_1$ ) и падения напряжения  $U = I_1 x_a$ . Перпендикулярно к вектору  $U_1$  расположен вектор тока  $I_1$ . Если, не изменяя нагрузки, регулировать возбуждение двигателя, то будет изменяться лишь реактивная составляющая тока. Можно

доказать, что при этом конец вектора эдс может перемещаться лишь по прямой, параллельной  $V_1$ . Напр., при некотором недовозбуждении вектор эдс займет положение  $E_3$ , вектор  $I_3 x_a$  — положение  $U_3$  и ток — положение  $I_3$ , т. е. будет отстающим. При перевозбуждении (векторы  $E_1$ ,  $U_1$ ) ток будет опережающим. Наконец, можно найти такое положение ( $E_2$ ,  $U_2$ ), при котором ток  $I_2$  будет целиком

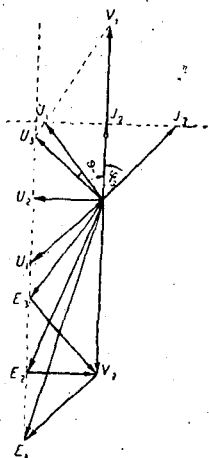


Рис. 123.

активным, т. е. будет совпадать с напряжением сети. Изменение тока  $I$  и здесь происходит по V-образной кривой, но в отличие от генератора ток будет отстающим при недовозбуждении и опережающим при перевозбуждении. Возможность работать всегда при  $\cos \varphi = 1$  составляет большое практическое достоинство синхронных двигателей. Недостатком этих машин является то, что их пуск в ход связан с некоторыми затруднениями. Чтобы пустить синхронный двигатель, его нужно сперва синхронизировать с сетью. Для этой цели можно применить специальный пусковой мотор, напр. асинхронный, или воспользоваться возбудителем (машиной постоянного тока, сидящей на одном валу с с. м. и служащей для питания ее роторной обмотки постоянным током). Последний способ применим, впрочем, лишь тогда, когда имеется источник постоянного тока, напр. аккумуляторная батарея. Современные синхронные двигатели пускаются обычно как асинхронные. Для этой цели на роторе устраивают из медных стержней и лобовых колец обмотку в виде беличьего колеса. Если теперь

подвести к статору переменное напряжение (для уменьшения пускового тока пониженное с помощью автотрансформатора), то вращающееся поле статора приведет ротор во вращение. Обмотку постоянного тока при этом замыкают накоротко; чтобы в ней не индуцировались опасные для ее целости высокие напряжения. По достижении скорости, близкой к синхронной, включают постоянный ток в обмотку возбуждения, благодаря чему под влиянием синхронизирующей силы ротор втягивается в синхронизм. После этого напряжение статора увеличивается до нормального, и пуск двигателя закончен.

*С. м. как фазокомпенсатор.* Выше мы видели, что перевозбужденный синхронный двигатель потребляет опережающий ток. Вследствие этого он ведет себя как конденсатор и может компенсировать действие индуктивности от других потребителей (напр., асинхронных двигателей), присоединенных к той же сети. Это свойство проявляется и при холостом ходе синхронного двигателя, когда он не совершает никакой механической работы. Такой двигатель получает обычно облегченную конструкцию и часто называется „синхронным конденсатором“. Разумеется, для той же цели может применяться и недовозбужденный генератор.

*Характеристики с. м.* С двумя основными характеристиками с. м. мы уже познакомились выше. Это — х-ки холостого хода и холостого замыкания.

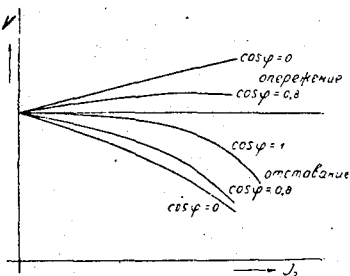


Рис. 124.

Внешние характеристики синхронного генератора, т. е. зависимости  $V = f(I_2)$ , показаны на рис. 124. При  $\cos \varphi = 1$  напряжение с увеличением тока постепенно уменьшается благодаря па-

дению напряжения и размагничивающему действию реакции якоря. При отстающем токе падение напряжения увеличивается с уменьшением  $\cos \varphi$ , т. к. сильно возрастает продольное (размагничивающее) поле реакции якоря. При некоторой емкостной нагрузке (опережающий ток) напряжение сохраняется приблизительно постоянным, т. к. здесь падение напряжения компенсируется дополнительным намагничиванием от реакции якоря. При еще большем опережении характеристика загибается кверху, т. к. влияние падения напряжения здесь уменьшается по сравнению с влиянием реакции. На рис. 125 показаны регулировочные характеристики для отстающего

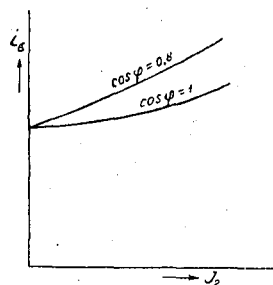


Рис. 125.

тока при  $\cos \varphi = 1$  и 0,8, т. е. кривые  $U_2 = f(I_2)$ . Характер кривых понятен из предыдущего. Для синхронных генераторов весьма важной величиной является процентное изменение напряжения, под которым понимают повышение напряжения при разгрузке от нормального тока до холостого хода при неизменном возбуждении. Эта величина составляет  $\varepsilon = \frac{E_1 - V}{V} 100\%$  и

увеличивается с уменьшением  $\cos \varphi$ , при отстающем токе. При опережающем токе  $\varepsilon$  становится отрицательным.

*Конструкции с. м.* На рис. 126 показан небольшой синхронный генератор с выступающими полюсами, 40 ква, 230 вольт, 1000 об/мин. Справа виден сидящий на одном валу с генератором возбудитель постоянного тока, питающий обмотку возбуждения. На рис. 127 показан ротор с выступающими полюсами генератора мощностью 40.000 ква, 300 об/мин. На рис. 128 виден монтаж

ротора быстроходного генератора с неясно выраженными полюсами (турбогенератора) мощностью 100.000 ква; 1500

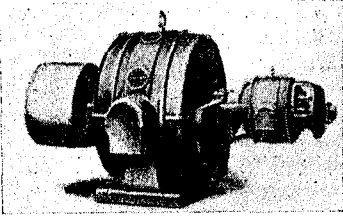


Рис. 126.

об/мин., приводимого во вращение паровой турбиной. На рис. 129 показан гидрогенератор (приводимый во вращение гидравлической турбиной) верти-

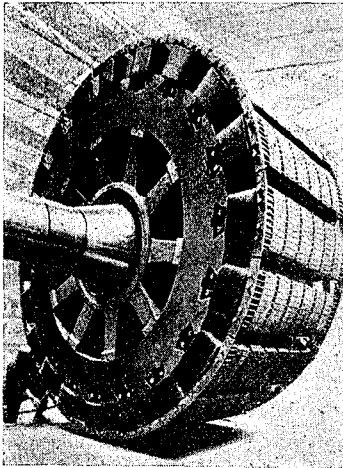


Рис. 127.

кального так называемого зонтичного типа, мощностью 18.350 ква, 600 об/мин. Наверху расположен возбудитель. Вертикальный вал этой машины пропущен вниз и там соединен непосредственно с турбиной.

**Вращающиеся преобразователи. Однородные преобразователи (о. п.).** Если в машине постоянного тока обмотку якоря помимо коллектора присоединить еще к кольцам, то получится устройство, позволяющее преобразовывать переменный ток в постоянный, или наоборот. Обычно о. п. применяется для преобразования перемен-

ного тока в постоянный. Для этой цели к кольцам подводится однофазный или многофазный ток, а с коллектора снимается постоянный; т. к. обмотка возбуждения питается здесь

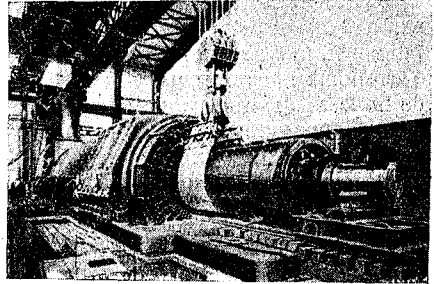


Рис. 128.

постоянным током, то о. п. можно рассматривать как совмещение в одной машине синхронного двигателя и генератора постоянного тока. Число контактных колец определяется числом фаз: для однофазного тока два кольца, для трехфазного — три и т. д. Наиболее часто встречаются шестифазные преобразователи с



Рис. 129.

шестью контактными кольцами. На рис. 130 показаны однофазный (слева) и трехфазный (справа) о. п. Для того чтобы не загромождать чертежа, коллектор показан снаружи обмотки. Ответвления к кольцам расположены на одинаковом друг от друга расстоянии, определяемом числом фаз. Число оборотов о. п. определяется как и для

синхронной машины формулой  $n = \frac{60f}{p}$ .

При нагрузке якорь стремится затормозиться, что вызывает уравнительный активный ток, идущий из сети. Этот ток, как и у синхронного двигателя, достигает такой величины, чтобы вызванный им момент вращения как раз уравновешивал момент сопротивления со стороны постоянного тока. Магнитное поле, вызванное переменным током в якоре, вращается относительно последнего с синхронной скоростью, основное же поле (от постоянного тока)

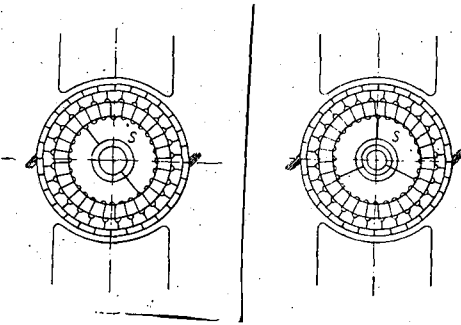


Рис. 130.

неподвижно в пространстве. Для возможности взаимодействия оба поля должны быть неподвижны друг относительно друга, и поэтому необходимо, чтобы якорь о. п. вращался в сторону, обратную направлению вращения его поля с той же синхронной скоростью. Т. к. в о. п. для восприятия переменного тока и отдачи постоянного служит одна и та же якорная обмотка, то, очевидно, напряжения переменного и постоянного тока находятся в определенном соотношении. Если последовательно откладывать напряжения отдельных витков обмотки, то, обойдя всю обмотку, мы получим замкнутый многоугольник с числом сторон, равным числу витков. При большом числе витков многоугольник практически превращается в окружность, диаметр которой равен напряжению на коллекторе. Хорда, соединяющая какие-либо две точки окружности, определяет амплитуду переменного напряжения, действующего между соответствующими токами обмотки. Если обмотка симметрично присоединена к  $m$  кольцам, т.е. точки присоеди-

нения колец расположены под углом  $\frac{2\pi}{m}$  (рис. 131), то амплитуда переменного напряжения, действующего между соседними кольцами  $E_n$ , равна хорде, стягивающей дугу  $\frac{2\pi}{m}$  окружности с диаметром  $E_g$ , т.е., как видно из чертежа,  $E_n = E_g$

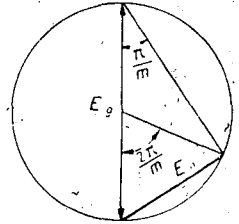


Рис. 131.

$\sin \frac{\pi}{m}$ , а эффективное значение при синусоидальной форме напряжения будет  $E_w = \frac{E_n}{\sqrt{2}} = \frac{E_g}{\sqrt{2}} \sin \frac{\pi}{m}$ . От-

метим, что для однофазного о. п.  $m = 2$ . Найденная формула справедлива для холостого хода, когда падения напряжения не имеют места, но и при нагрузке отклонения от нее невелики. Т. к. величины напряжения стандартизованы, то нельзя так подобрать  $E_w$  и  $E_g$ , чтобы они оба одновременно отвечали стандартным значениям. Поэтому непрерывной принадлежностью о. п. является трансформатор; включаемый между кольцами и сетью переменного тока. Величина постоянного и переменного токов также находится в определенном соотношении, которое мы даем здесь без вывода. Если обозначить постоянный ток через  $I_g$ , а линейный-переменный через  $I_w$ ,

то  $I_w = \frac{2\sqrt{2}I_g}{m \cos \varphi}$ . Отношения  $\frac{E_w}{E_g}$  и  $\frac{I_w}{I_g}$  (для  $\cos \varphi = 1$ ) приведены в следующей таблице:

Число фаз:	1	3	6
$\frac{E_w}{E_g}$	0,707	0,612	0,354
$\frac{I_w}{I_g}$	1,41	0,943	0,472

Т. к. эдс якоря индуцируется единственным результирующим магнитным потоком и т. к. переменный ток, являясь двигательным, составляет с эдс угол  $> 90^\circ$ , а постоянный ток, будучи генераторным, находится в фазе с эдс, то постоянный и переменный токи протекают в якоре почти в противо-



положном направлении, и через проводники якоря проходит разность этих токов. Благодаря этому потери в якоре у о. п. меньше, чем, напр., у генератора постоянного тока при той же мощности и притом тем меньше, чем больше число фаз. Так, например, шестифазный о. п. при тех же размерах и при  $\cos \varphi = 1$  может отдать мощность почти вдвое (точнее, в 1,93 раза) большую, чем генератор постоянного тока. Чем меньше  $\cos \varphi$ , тем меньше и мощность о. п. Соответственно и падение напряжения в о. п. меньше, чем в машине постоянного тока. Подводимый к о. п. переменный ток можно разложить на активную и реактивную составляющие. Активная составляющая создает поперечное поле реакции якоря, направленное против поперечного поля реакции постоянного тока (т. к. эти токи сдвинуты на  $180^\circ$ ). Благодаря этой взаимной компенсации поперечное поле якоря о. п. не существует (вернее, остается незначительная разность полей, вследствие различной формы мдс постоянного и переменного тока). Реактивная составляющая создает продольную реакцию, размагничивающую или намагничивающую машину, в зависимости от направления сдвига фаз. Коммутация в о. п. происходит точно так же, как и в машинах постоянного тока. Если о. п. снабжен дополнительными полюсами, то число их ампер-витков может быть значительно меньше, чем в машине постоянного тока, т. к. при отсутствии поперечного поля их задача сводится только к улучшению коммутации. Если желательно регулировать напряжение на стороне постоянного тока, то нельзя воспользоваться изменением возбуждения, т. к. таким путем будет, как и у всякого синхронного двигателя, изменяться лишь реактивная составляющая тока, влияние которой на падение напряжения о. п. слишком мало вследствие небольшой величины реактивного сопротивления. Обычно для возможности регулирования увеличивают реактивное сопротивление путем включения дроссельной катушки между кольцами и сетью или путем увеличения рассеяния трансформатора. Тогда реактивный ток, возникающий при из-

менении возбуждения, будет обуславливать уменьшение (при недовозбуждении) или увеличение (при перевозбуждении) напряжения на кольцах, а, следовательно, и на коллекторе. Диаграмма регулирования показана на рис. 132. Ток  $I_w$  направлен по вертикали. При недовозбуждении напряжение трансформатора  $V_t$  и напряжение

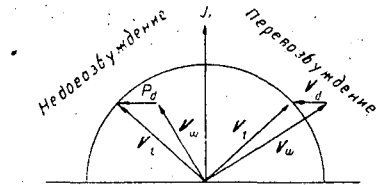


Рис. 132.

дроссельной катушки  $V_d$  дают напряжение на кольцах  $V_w < V_t$ , а при перевозбуждении  $V_w > V_t$ . Пуск в ход о. п. совершается либо со стороны постоянного тока в качестве шунтового двигателя (если в распоряжении есть источник постоянного тока), или теми же способами, как и для синхронного двигателя (см. выше).

**Мотор-генератор (м.-г.).** Для превращения переменного тока в постоянный можно применить агрегат, состоящий из соединенных между собой двигателя переменного тока и генератора постоянного тока, т. наз. м.-г. Двигатель может быть как синхронным, так и асинхронным. Обычно применяется последний, как дающий большие удобства при пуске в ход. Достоинством м.-г. является полная свобода в выборе напряжений отдельных машин и их независимость друг от друга. Недостаток—меньший по сравнению с о. п. кпд.

**Каскадный преобразователь (к.п.).** Промежуточное положение между о. п. и м.-г. занимает к.п., состоящий из асинхронного двигателя и о. п., механически и электрически связанных друг с другом. Отличительным свойством к.п. является то, что здесь о.п. работает не только как преобразователь, но и частично как генератор постоянного тока. В виду ограниченного применения в настоящее время к.п. мы подробно его теорию рассматривать не будем.

*Конструкции.* На рис. 133 показан шестифазный о. п. мощностью 1000 квт,

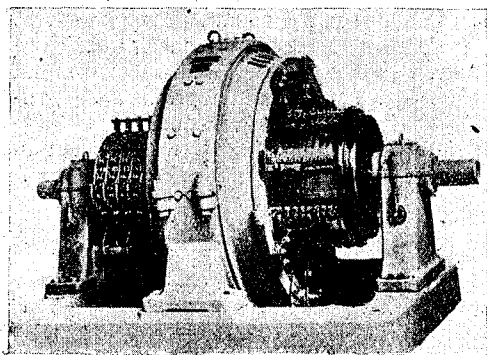


Рис. 133.

750 об./мин., 600 вольт на стороне постоянного тока. Слева расположены кольца, справа—коллектор. На рис. 134 показан м.-г. на 2000 квт, 593 об./мин., состоящий из асинхронного двигателя (справа) и генератора постоянного тока. Небольшая машина, расположенная за асинхронным двигателем, представляет собой фазокомпенсатор (см. ниже).

*Коллекторные машины переменного тока. Коллекторные двигатели (к. д.). а) Однофазный двигатель серийного возбуждения (о. с.).* Если взять обычный двигатель постоянного тока серийного возбуждения и подвести к его зажимам однофазный переменный ток, то двигатель придет во вращение. Здесь магнитный поток в обмотке возбуждения вызывается тем же током, который проходит и через якорь, а следов. направление потока и якорного тока меняются одновременно, что по праву левой руки приведет к вращающему моменту, направленному всегда в одну и ту же сторону. Т. к. поток здесь пульсирует, то весь магнитопровод для уменьшения потерь должен быть собран из листового железа. На практике, однако, такой двигатель должен подвергнуться некоторым конструктивным изменениям, т. к. большая индуктивность обмоток возбуждения и якоря привела бы к слишком низкому

коэффициенту мощности. Поэтому для уменьшения индуктивности обмотки возбуждения ее изготавливают с возможно малым числом витков, а якорный поток, не приносящий никакой пользы, уничтожают с помощью компенсирующей обмотки, обтекаемой тем же током, что и якорь, но в таком направлении, чтобы оба потока были направлены навстречу и друг друга компенсировали. Схема о. с. показана на рис. 135. Здесь В—обмотка возбуждения, А—якорь, К—компенсирующая обмотка. При таком устройстве индуктивности якоря и компенсирующей обмотки будут обусловлены только полями рассеяния, т. е. будут сведены к минимальной величине. Что касается коммутации тока, то в о. с. она, совершаясь по тем же законам, что и в машине постоянного тока, несколько осложняется благодаря тому, что короткозамкнутая секция во время

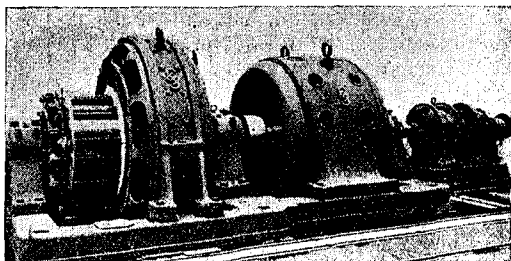


Рис. 134.

коммутации подвергается действию не только собственного поля самоиндукции, вызванного изменением тока, но и действию пульсирующего потока возбуждения, наводящего в ней т. наз.

трансформаторную эдс (т. к. короткозамкнутая секция и обмотка возбуждения представляют собой т-р). Обе эдс, наводимые этими потоками, складываются геометрически и дают результирующее напряжение коммутации  $e$ , под влиянием которого появляется добавочный ток  $i = \frac{e}{z}$

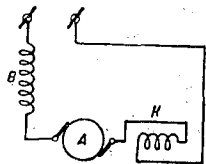


Рис. 135.

(здесь  $z$  — кажущееся сопротивление цепи короткозамкнутой секции), перегружающий щетки и могущий вызвать искрение на коллекторе. Уменьшить ток  $i$  можно либо путем увеличения  $z$ , либо путем уменьшения  $e$ . В первом случае между коллекторными пластинами и обмоткой якоря включают сопротивления из плохого проводника (железо, никелин и т. д.). Этот метод обладает рядом отрицательных качеств и в настоящее время не применяется. Для уменьшения эдс  $e$  прибегают к устройству дополнительных полюсов, создающих в короткозамкнутой секции эдс  $e_k$ , равную и противоположную  $e$ . В о. с. задача устройства дополнительных полюсов осложняется необходимостью компенсировать две эдс, изменяющиеся по совершенно различным законам. Поэтому ни одна из схем полностью не удовлетворяет всем требованиям. Наиболее употребительным и целесообразным является последовательное соединение дополнительных полюсов, показанное на рис. 136. Здесь  $B$  — обмотка возбуждения,  $K$  — компенсирующая,  $A$  — якорная и  $D$  — дополнительных полюсов, причем параллельно с последней включено регулируемое сопротивление  $R$  для того, чтобы сдвинуть ток в обмотке  $D$  по сравнению с

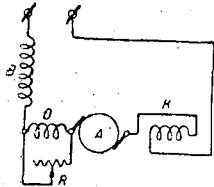


Рис. 136.

главным током двигателя. Напряжение сети, приложенное к зажимам двигателя, должно уравновесить: эдс, появляющуюся в роторе под влиянием вращения в магнитном поле статора (противо эдс)  $E_1$ , находящуюся в фазе с током; эдс самоиндукции обмотки возбуждения  $E_2$ , отстающую от тока на  $90^\circ$ ; омическое падение напряжения во всех обмотках  $E_3$ , находящиеся в фазе с током, и индуктивное падение напряжения от рассеяния в тех же обмотках  $E_4$ , отстающее от тока на  $90^\circ$ . Векторная диаграмма для о. с. показана на рис. 137. Т. к. эдс  $E_1$  зависит от скорости вращения, то из диаграммы ясно, что чем быстрее вращается двигатель, тем меньше будет сдвиг фаз между током и напряжением (тем боль-

ше  $\cos \varphi$ ). Отсюда же ясно, что в о. с. коэффициент мощности никогда не может стать равным 1 (хотя при больших скоростях вращения он иногда доходит до 0,95). Пуск в ход о. с. совершается с помощью регулируемого трансформатора, понижающего напряжение сети. С помощью того же т-ра регулируется и скорость этих двигателей. Главнейшая область применения о. с. — железнодорожная тяга.

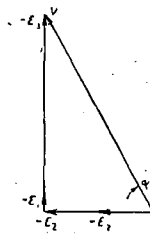


Рис. 137.

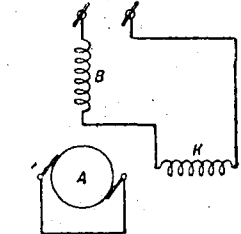


Рис. 138.

б) *Однофазный репульсионный двигатель* (о. р.). Схема о. р. показана на рис. 138. Здесь имеются две статорных обмотки  $B$  и  $K$ , соединенные последовательно и включенные на напряжение сети и якорь  $A$ , обмотка которого замкнута накоротко. Пульсации потока  $K$  вызывают в якорной обмотке ток, который, взаимодействуя с потоком обмотки  $B$ , и создает вращающий момент двигателя. Большим преимуществом о. р. является полное отделение статора от ротора, что позволяет присо-

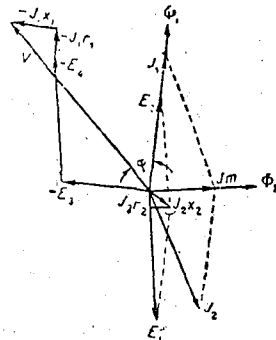


Рис. 139.

единять машину непосредственно к сети довольно высокого напряжения. Векторная диаграмма о. р. показана на рис. 139. Токи статора  $I_1$  и ротора  $I_2$  складываясь как в т-ре, дают намаг-

ничающий ток  $I_m$ , в фазе с которым находится поток  $\Phi_2$ , создаваемый обмоткой  $K$ . Поток  $\Phi_1$  обмотки  $B$  находится в фазе с током статора  $I_1$ . Поток  $\Phi_2$  наводит в роторе эдс трансформации  $E_1$ , сдвинутую от него на  $90^\circ$ , а поток  $\Phi_1$  наводит в том же роторе эдс вращения  $E_2$ , находящуюся в фазе с  $\Phi_1$ . Эдс  $E_1$  и  $E_2$ , складываясь, дают результирующую, идущую на покрытие омического ( $I_2 r_2$ ) и индуктивного ( $I_2 x_2$ ) падений напряжения в роторе. Напряжение сети должно уравновесить: эдс  $E_3$ , наводимую в статорной обмотке  $B$  колебаниями ее собственного потока  $\Phi_1$  (эдс самоиндукции), эдс  $E_4$ , наводимую в обмотке  $K$  потоком  $\Phi_2$ , омическое падение напряжения в статоре  $I_1 r_1$  и индуктивное падение напряжения  $I_1 x_1$ . Рассмотренный о. р. можно упростить (двигатель Томсона), соединив обе статорных обмотки в одну и расположив ее под некоторым углом  $\alpha$  к оси щеток (рис. 140).

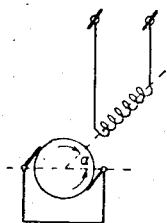


Рис. 140.

Получающийся наклонный магнитный поток можно геометрически разложить на два: вертикальный (перпендикулярно к оси щеток) и горизонтальный (по оси щеток). Если устроить приспособление для перемещения щеток по коллектору, то поворотом их оси можно изменять угол  $\alpha$ , а, следовательно, и регулировать величины составляющих потоков. При таком сдвиге щеток, когда  $\alpha = 0$  или  $90^\circ$ , двигатель вращаться не будет, т. к. в первом случае  $\Phi_1 = 0$ , а во втором  $\Phi_2 = 0$ . Для пуска двигателя в ход устанавливают щетки под углом  $\alpha = 90^\circ$ , включают статорную обмотку на сеть и начинают медленно поворачивать щетки. При этом двигатель приходит во вращение, при чем величина крутящего момента будет зависеть от отношения между потоками  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , т. е. от угла поворота щеток. Максимальный момент обычно достигается при  $\alpha \cong 15^\circ$ . Следует отметить, что при пусковом положении ( $\alpha = 90^\circ$ ) короткозамкнутые секции обмотки якоря сцеплены с полным потоком статора, что вызывает значительные внутренние

токи. Этим недостатком не обладает показанный на рис. 141 о. р. системы Дери с двумя парами щеток. Здесь одна пара щеток ( $A, A_1$ ) установлена неподвижно, а другая пара ( $B, B_1$ ) может перемещаться с помощью особого приспособления. Щетки соединены между собой попарно ( $A$  с  $B, A_1$  с  $B_1$ ) гибким кабелем. Из чертежа видно, что, сдвигая подвижные щетки на угол  $2\alpha$ , мы перемещаем ось статорной обмотки всего на угол  $\alpha$ . Т. к. щетки попарно замкнуты накоротко, то ток проходит лишь по тем участкам обмотки, которые лежат между соединенными между собой щетками. При пуске в ход ( $\alpha = 90^\circ$ ) щетки поворачиваются на угол  $2\alpha = 180^\circ$ , и замыкаемые ими катушки не будут совершенно сцеплены с потоком статора. Другими преимуществами двигателя Дери являются более плавное изменение скорости и более благоприятная коммутация тока. Реверсирование, т. е. изменение направления вращения, достигается в о. р. поворотом щеток в обратном, по отношению к пусковому, направлении. Коэффициент мощности этих двигателей довольно высок и приблизительно равен  $\cos \varphi$  трехфазных асинхронных двигателей такой же мощности. Главнейшей областью применения о. р. является текстильная промышленность, особенно в прядильных машинах.

с) *Трехфазный двигатель серьезного возбуждения* (т. с.). Схема т. с.

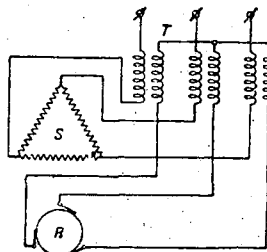


Рис. 142.

показана на рис. 142. Здесь  $S$  — соединенный в треугольник статор, выполненный точно так же, как и у нормального асинхронного двигателя,

$R$  — ротор, представляющий собой якорь постоянного тока. На якоре расположены три щетки, сдвинутые на угол  $120^\circ$  и присоединенные ко вторичным обмоткам т. наз. сериес-трансформатора. Благодаря тому, что первичные обмотки трансформатора обтекаются током статора, ток ротора будет ему пропорционален. Благодаря как бы последовательному соединению обмоток статора и ротора, фазы мдс этих обмоток совпадают. Т. к. статор и ротор имеют трехфазную обмотку, то они совместно создают вращающееся магнитное поле, если обмотки включены так, что поля статора и ротора вращаются в одну сторону. Вращающийся момент двигателя будет зависеть не только от величины результирующего поля, но и от относительного положения составляющих полей в пространстве, обусловленного положением щеток на коллекторе. Перемещая щетки, можно изменять пространственное положение роторного поля, а, следов., и величину вращающего момента. Результирующее магнитное поле, пересекая витки обмотки статора и ротора, наводит в них эдс:  $E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{w1} \Phi 10^{-8}$  и  $E_2 = 4,44 s f_1 w_2 k_{w2} \Phi 10^{-8}$ , где  $f_1$  — частота сети,  $s$  — скольжение ротора,  $w_1$  и  $w_2$  — числа витков статорной и роторной обмоток,  $k_{w1}$  и  $k_{w2}$  — обмоточные коэффициенты,  $\Phi$  — результирующий поток. Если предположить, что обе обмотки выполнены одинаково с одинаковым числом витков (если этого нет, то можно оперировать с приведенными величинами), то из этих уравнений получается, что  $\frac{E_2}{E_1} = s$ . Если щетки сдвинуты на коллекторе на угол  $\alpha$  (нормально угол  $\alpha \cong 150^\circ$ ), то на такой же угол должны быть сдвинуты и мдс статора и ротора, а следовательно и эдс  $E_1$  и  $E_2$ . Пренебрегая потерями, можно сказать, что напряжение сети  $V$  должно уравновесить эти эдс. Тогда получается диаграмма, показанная на рис. 143. Точка  $A$  и треугольник равновесия  $BAC$  соответствуют случаю, когда  $E_1 = E_2$ , т. е.  $s = 1$ , или двигатель неподвижен. По мере увеличения скорости,  $s$  будет уменьшаться, а вместе с ним и  $E_2$ . Т. к. угол

между  $E_1$  и  $E_2$  должен оставаться постоянным, то точка  $A$  будет перемещаться по окружности, описанной вокруг треугольника  $BAC$ . При дальнейшем возрастании скорости  $E_2$  будет уменьшаться еще больше, пока при синхронизме ( $s = 0$ ) оно не делается равным нулю, т. е. точка  $A$  переместится в  $B$  и напряжение сети будет уравновешивать только эдс статора  $E_1$ . При увеличении скорости за синхронизм,  $E_2$  сделается отрицательным. При двойной синхронной скорости ( $s = -1$ ) точка  $A$  придет в  $A_2$ , т. к.  $E_1 = -E_2$ . Из диаграммы видно, что если  $E_1$  и  $E_2$  при неподвижном двигателе равны, т. е. равны  $w_1$  и  $w_2$ , то при разворачивании ротора  $E_1$  сперва увеличивается, а потом уменьшается. В таком двигателе момент вращения при пуске в ход будет неустойчив. Для того, чтобы  $E_1$  все время уменьшалось, необходимо, чтобы  $E_1$  было больше  $E_2$  и притом так, чтобы при пуске в ход  $E_2$  было перпендикулярно к  $V$  (точка  $A_1$  на рис. 144). С другой стороны, для получения высокого коэффициента мощности необходимо, чтобы число витков ротора было больше числа витков статора, при чем  $\cos \varphi = 1$  при синхронизме получается тогда, когда эдс  $E_1$  при пуске перпендикулярна к  $V$  (точка  $A_2$  на рис. 144). Т. о. условия устойчивости и высокого  $\cos \varphi$  противоречат друг другу и в обычном

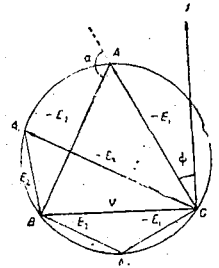


Рис. 143.

т. с. выполнены одновременно быть не могут. Поэтому часто на коллекторе т. с. располагают два комплекта щеток (подвижные и неподвижные), присоединенных к 6 концам сериес-трансформатора. Тогда, изменяя расстояние между щетками, легко при пуске выполнить условие устойчивости, а при работе —

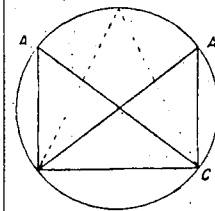


Рис. 144.

т. с. выполнены одновременно быть не могут. Поэтому часто на коллекторе т. с. располагают два комплекта щеток (подвижные и неподвижные), присоединенных к 6 концам сериес-трансформатора. Тогда, изменяя расстояние между щетками, легко при пуске выполнить условие устойчивости, а при работе —

условие высокого коэффициента мощности.

д) *Трехфазный двигатель шунтового возбуждения* (т. ш.). Схема т. ш. показана на рис. 145. Статор  $S$

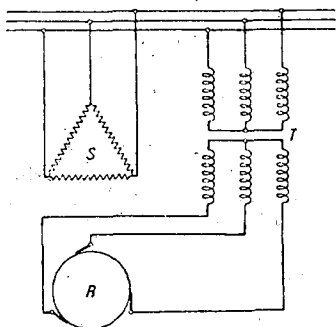


Рис. 145.

снова имеет такое же выполнение, как и у обычного асинхронного двигателя, ротор  $R$  представляет собой якорь машины постоянного тока, связанный через трансформатор с сетью. Трансформатор  $T$  выполняется обычно в виде регулирующегося автотрансформатора. С электрической стороны описываемый двигатель представляет собой асинхронный двигатель, к ротору которого подводится напряжение сети (двигатель двойного питания). Т. к. частота тока в роторе иная, чем в сети, то связать ротор и сеть непосредственно нельзя, и роль коллектора сводится здесь к преобразованию частоты сети в частоту ротора. Это становится понятным, если вспомнить, что здесь, как и у обычного асинхронного двигателя, поле ротора вращается по отношению к неподвижному статору (или неподвижным щеткам) с синхронной скоростью, независимо от скорости вращения самого ротора, т. е. между щетками всегда будет индуцироваться эдс частоты сети. Векторная диаграмма т. ш. показана на рис. 146. Она отличается от диаграммы обычного асинхронного двигателя только наличием в роторе кроме эдс  $E_2$ , индуцированной вращающимся полем, напряжения, подведенного к ротору от тр-ра.  $V_2$  можно сдвигать по отношению к  $V_1$  либо смещая щетки, либо пользуясь тр-ом специальной кон-

струкции (на диаграмме  $V_1$  и  $V_2$  сдвинуты на угол  $\alpha$ ). Если изменять угол  $\alpha$  и одновременно изменять величину  $V_2$  (путем изменения передаточного числа тр-ра), то тем самым можно влиять на наклон вектора  $I_2$   $r_2$ , а, следовательно, и находящегося с ним в фазе вектора вторичного тока  $I_2$ . Т. к. направление тока холостого хода  $I_0$  остается постоянным, то, поворачивая вектор  $I_2$  против часовой стрелки, мы

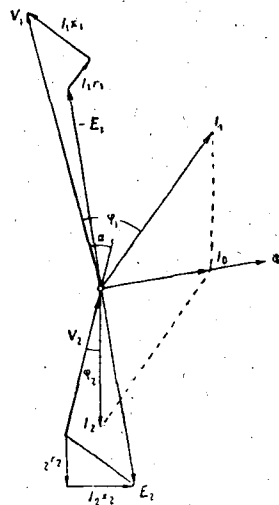


Рис. 146.

одновременно поворачиваем и вектор  $I_1$ . Увеличив в достаточной степени  $\alpha$  и  $V_2$ , можно привести векторы  $I_1$  и  $V_1$  к одному направлению, т. е. установить  $\cos \varphi = 1$ . Характерной особенностью т. ш. является возможность широкой и притом экономичной регулировки скорости в области как ниже, так и выше синхронизма. Сила тока в роторе асинхронного двигателя была равна  $I_2 = \frac{E_2}{z_2}$ , где  $E_2$  — эдс ротора, а  $z_2$  — его кажущееся сопротивление. В т. ш.  $I_2 = \frac{\vec{E}_2 - \vec{V}_2}{z_2}$ , т. е. устанавливается геометрической разностью  $E_2$  и  $V_2$ . Если при том же моменте вращения, т. е. при том же токе  $I_2$  изменить  $V_2$ , то сейчас же должно будет измениться и  $E_2$ , а это может произойти только за счет изменения скольжения, т. е. изменения скорости вращения. Изменив

напряжение  $U_2$ , мы заставим измениться и направление  $E_2$ , т.е. двигатель вынужден будет вращаться с сверхсинхронной скоростью. Недостатком описанного т. ш. системы Винтер-Эйхберга является наличие громоздкого регулировочного тр-ра и контроллера для управления этим тр-ром. В виду этого в настоящее время двигатели такой системы встречаются очень редко, будучи вытеснены более простыми т. ш. системы Шраге-Рихтера. В этом двигателе регулировочный тр-р как бы заделан в самую машину и составляет с ней органическое целое. Двигатель Шраге-Рихтера является обращенным, т.е. он питается со стороны ротора через три контактных кольца. Т. к. для работы машины безразлично, какая часть ее является первичной, а какая вторичной, то на существо дела это не влияет. Помимо этой главной обмотки  $A$  (рис. 147), на роторе в тех же впадинах расположена еще

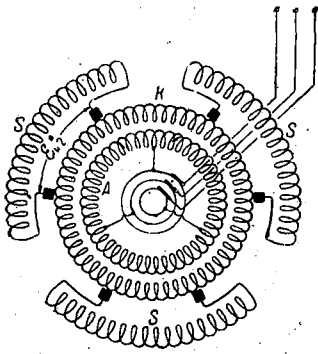


Рис. 147.

вспомогательная обмотка  $K$  с коллектором (на чертеже коллектор для ясности не показан) и шестью щетками, составляющими три отдельных комплекта. Статорная обмотка  $S$  состоит из трех несоединенных между собою фазных обмоток, при чем концы каждой фазы статора присоединены к трем группам щеток. Щетки, принадлежащие к каждой группе, могут одновременно сдвигаться или раздвигаться. Их можно сдвинуть и так, что щетки каждой группы станут на одну и ту же пластину, т.е. обмотки статора окажутся короткозамкнутыми. Их можно также передвинуть из этого по-

ложения в противоположные стороны. Если щетки стоят на одной и той же пластине, то фаза статора замкнута накоротку, и двигатель ведет себя как обычный асинхронный двигатель, вращаясь со скоростью, близкой к синхронизму. Перемещая щетки в ту или иную сторону, мы добавляем к статорной эдс напряжение  $E_{кв}$ , индуктируемое вращающимся полем в дополнительной обмотке, или вычитаем его. Благодаря этому скольжение двигателя должно увеличиться или уменьшиться, что повлечет за собой уменьшение или увеличение скорости. Двигатели Шраге-Рихтера рассчитываются обычно так, чтобы число оборотов можно было изменять от  $\frac{1}{2}$  синхронного до  $\frac{3}{2}$  синхронного, т.е. в отношении 1:3.

е) *Компенсированный асинхронный двигатель* (к. а.). Большим недостатком обычного асинхронного двигателя является сдвиг фаз между током и напряжением, особенно резко проявляющийся при недогрузках. К. а. свободен от этого недостатка и позволяет при значительных изменениях нагрузки поддерживать  $\cos \varphi = 1$ . На рис. 148 показана схема к. а. Гейланда. Этот двигатель имеет две статорных и две роторных обмотки. Статорная обмотка  $S_1$  и роторная  $R_1$  представляют собой нормальные обмотки обычного асинхронного двигателя. Обмотка ротора  $R_2$  имеет

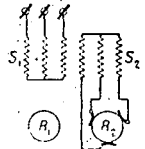


Рис. 148.

коллектор с тремя щетками, присоединенными ко второй статорной обмотке  $S_2$ . При работе к. а. в обмотке  $R_2$  индуктируется эдс, передаваемая в обмотку  $S_2$ . Т. к.  $S_2$  и  $S_1$  связаны индуктивно, то фаза тока, поступающего из сети, определяется совместным действием обмоток  $S_1$  и  $S_2$ . Смещая щетки на коллекторе, можно добиться того, что сдвиг фаз между напряжением сети и током статора исчезнет, т.е.  $\cos \varphi$  станет равным 1. На рис. 149 показан другой к. а. системы Основа. Здесь, как и в двигателе Шраге, питание машины происходит со стороны ротора. На роторе имеются две обмотки, обычная трехфазная  $R_1$ , соединяемая посредством колец с сетью, и

обмотка постоянного тока  $R_2$ , щетки которой присоединены к статорной обмотке  $S$ . Другие концы фаз статорной обмотки присоединены к пусковому

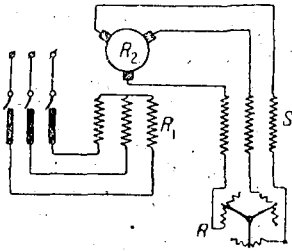


Рис. 149.

реостату  $R$ . Благодаря наличию коллектора и здесь в обмотку статора добавляется некоторое напряжение, позволяющее довести  $\cos \varphi$  до 1.

г) *Двигатель Шюлера* относится к типу т. наз. синхронизированных асинхронных двигателей, которые пускаются как асинхронные, а по достижении полной скорости переключаются на питание обмотки возбуждения постоянным током и тем превращаются в синхронные. Схема этого двигателя показана на рис. 150. Питание двигателя производится со стороны ротора, который

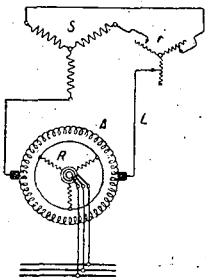


Рис. 150.

имеет здесь две обмотки: нормальную трехфазную  $R$  и обмотку  $A$  с коллектором и двумя щетками. Статорная обмотка  $S$  присоединена концом одной фазы к левой щетке, а две другие фазы через пусковой реостат  $r$  присоединены к правой щетке. При пуске в ход двигатель работает как асинхронный, частота на коллекторе имеет величину, соответствующую асинхронизму двигателя. После вхождения в синхронизм на щетках появляется напряжение постоянного тока и статорная обмотка  $S$  становится обмоткой возбуждения.

*Специальные машины.* а) Преобразователь частоты. Из-за коммутационных затруднений коллектор-

ные двигатели не могут быть построены быстроходными при большой мощности. В тех случаях, когда необходимо одно временно получить и быстроходность и большую мощность, и свойства коллекторного двигателя, приходится прибегать к т. наз. каскадным схемам включающим в себя обычный асинхронный двигатель и отдельную специальную коллекторную машину (иногда несколько таких добавочных машин). Для целей экономической регулировки скорости больших асинхронных двигателей можно прибегнуть к каскадному соединению их с преобразователем частоты. Последний, как видно из рис. 151, состоит из якоря машины постоянного тока, снабженного одно-

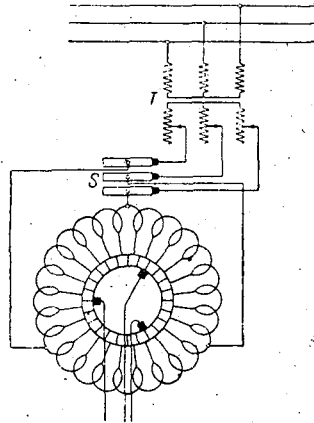


Рис. 151.

временно и коллектором, и кольцами. Статор преобразователя частоты не имеет обмотки и служит лишь для замыкания силовых линий поля. Кольца  $S$  через посредство регулирующего тра  $T$  присоединены к сети, а щетки присоединяются к ротору главного асинхронного двигателя. Если якорь неподвижен, то напряжение сети создает вращающееся поле, которое, вращаясь относительно якоря с синхронной скоростью, вызывает между щетками напряжение той же периодичности, что и в сети. Если теперь якорь привести каким-либо посторонним двигателем в сторону, противоположную вращению поля, то число оборотов поля по отношению к неподвижным щеткам уменьшится и соответственно умень-



шится и частота напряжения на кольцах. Т. о., изменяя скорость вращения, можно получить на щетках любую частоту от 0 (скорость вращения равна синхронной) до частоты сети (якорь неподвижен). Если посадить преобразователь частоты на один вал с асинхронным двигателем или соединить его зубчатой передачей (рис. 152), то частота напряжения на коллекторе всегда

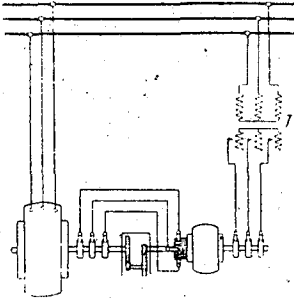


Рис. 152.

будет равна частоте тока в роторе двигателя. Регулируя напряжение на коллекторе трансформатором  $T$ , можно воздействовать на скольжение асинхронного двигателя и регулировать его скорость. Т. к. по существу устройства преобразователь частоты представляет собою двигатель Винтер-Эйхберга, но без статорной обмотки, то для регулирования скорости можно воспользоваться и последним и тогда получится каскадное соединение асинхронного двигателя с коллекторным.

б) Фазокомпенсаторы. Для улучшения коэффициента мощности больших асинхронных двигателей прибегают к каскадному соединению их с особым фазокомпенсатором. Компенсатор Леблана состоит из якоря с коллектором и тремя щетками и статора, лишённого обмотки. Если к якорю подвести трехфазный ток, то обмотка создаст вращающееся поле, перемещающееся в пространстве с синхронной скоростью, не зависящей от скорости

самого якоря,  $n = \frac{60f}{p}$ . Если якорь привести во вращение в ту же сторону со скоростью  $n_1$ , то поток будет пересекать витки обмотки со скоростью  $n - n_1 = sn$  и вызовет в обмотке эдс  $E = 4,44 k_w \omega s f \Phi 10^{-8}$ . Эдс  $E$  отстаёт

от потока на  $90^\circ$ , но если увеличить скорость за синхронную, т. е. сделать  $S$  отрицательным, то  $E$  также будет отрицательной и станет уже опережать  $\Phi$  на  $90^\circ$ . Этим свойством и пользуются для компенсации сдвига фаз асинхронного двигателя включая фазокомпенсатор в цепь его ротора, как показано на рис. 153, и вращая якорь посторонним двигателем  $B$  с сверхсинхронной скоростью. На рис. 153  $S$  — статор главного двигателя,  $K$  — фазокомпенсатор. В качестве фазоком-

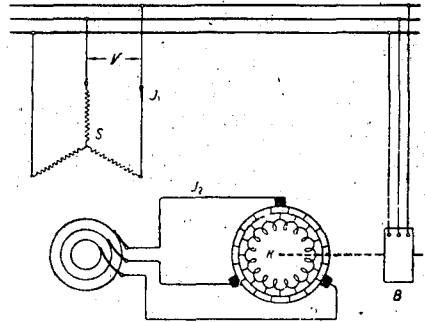


Рис. 153.

пенсатора можно применить и рассмотренный нами выше преобразователь частоты, т. к., сдвигая щетки на его коллекторе, можно дать напряжению на щетках любую фазу.

с) Сложные каскады. Помимо рассмотренных простых каскадных схем, в больших установках применяют сложные каскады, состоящие из главного асинхронного двигателя и ряда дополнительных машин: двигателей, преобразователей, генераторов, фазокомпенсаторов и т. д. В виду узкого специального назначения этих агрегатов и многообразия систем, мы их рассматривать не будем, отсылая интересующихся к специальной литературе (см. в конце статьи).

*Конструкции коллекторных машин.* На рис. 154 показан железнодорожный серийный однофазный двигатель мощностью 1500 л. с., с компенсирующей обмоткой и дополнительными полюсами. На рис. 155 показан репульсионный однофазный двигатель типа Дерри, мощностью 10 квт, 1500 об/мин. Справа, возле шкива, виден маховичек, служащий для перемещения щеток. На

рис. 156 изображен трехфазный серийный двигатель с двойным комплектом щеток, мощностью 22 квт,  $n = 750$  об/мин.



Рис. 154.

На рис. 157 показан двигатель Шраге-Рихтера, мощностью 30 квт с числом оборотов от 375 до 1.000. На рис. 158 показан компенсированный асинхронный

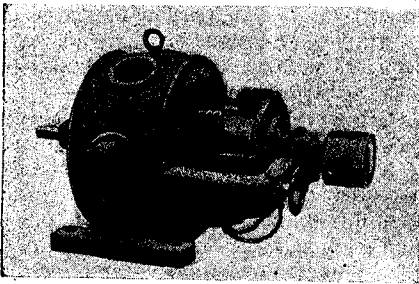


Рис. 155.

двигатель с роторным питанием (по Осносу) мощностью 30 квт, 1.500 об/мин. На рис. 159 показано каскадное соединение асинхронного двигателя с преобразователем частоты (слева). Посредине видна зубчатая передача. На рис. 160 изображен фазокомпенсатор, приводимый во вращение асинхронным двигателем (слева).

*Ртутные выпрямители* (р. в.). За последние годы серьезными конкурентами для однокорных преобразователей сделались ртутные выпрями-

тели. Действие р. в. основано на та наз. вентильном действии вольтовой

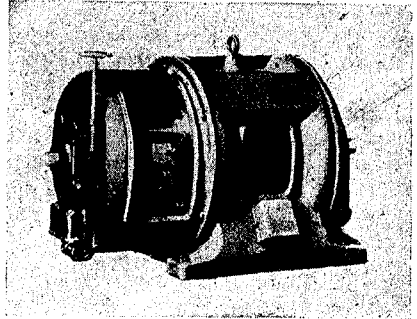


Рис. 156.

дуги, горящей в вакууме. Если стеклянный баллон, из которого выка-

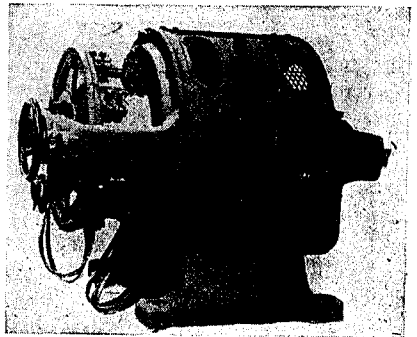


Рис. 157.

чен воздух до высокой степени разряжения, впаять две проволоки, из

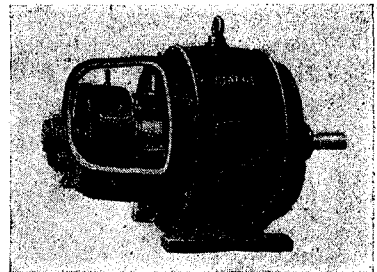


Рис. 159.

которых одна соприкасается с ртутью налитой в баллон, а другая соединена

с графитным или железным электродом, то такой прибор может служить элементарным выпрямителем тока.

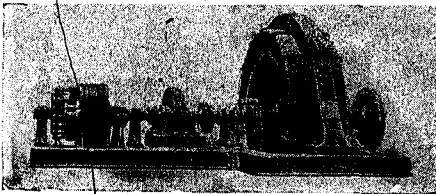


Рис. 159.

Подведя к электродам напряжение, замкнув на момент цепь наклонением сосуда и разорвав эту цепь возвращением сосуда в первоначальное положение, мы получим между электродами устойчивую вольту дугу. Если подвести к электродам переменный ток, то он сможет проходить только в направлении от железа или графита к

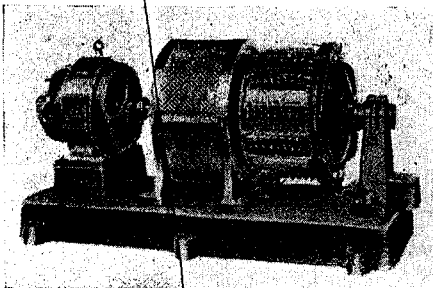


Рис. 160.

ртути, т.е. только в том случае, если ртуть будет катодом, а другой электрод—анодом. При перемене полярности ток не будет проходить, даже если приложить к электродам напряжение в несколько тысяч вольт. Для того чтобы дуга не потухла после первого же полупериода переменного тока (дуга тухнет, если ее оставить без напряжения на 0,00001 сек., тогда как полупериод тока длится 0,01 сек.), в такой примитивной установке необходимо иметь дополнительное зажигающее приспособление, поддерживающее дугу в непрерывном горении. На рис. 161 показан сверху такой примитивный выпрямитель, а под ним—

форма получаемого постоянного тока (чтобы не затемнять чертежа, зажигающее приспособление здесь не показано). Для того чтобы иметь возможность выпрямлять обе полуволны переменного тока, можно применять схему, показанную на рис. 162. Здесь между сетью и выпрямителем поме-

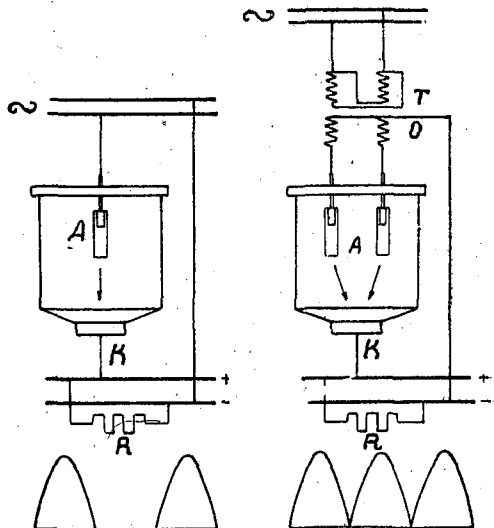


Рис. 161.

Рис. 162.

щен трансформатор  $T$ . К вторичной обмотке его присоединены два анода ( $A$ ). Катод ( $K$ ) присоединен к одному полюсу приемника постоянного тока ( $R$ ), а к другому полюсу присоединяется нулевая (средняя) точка вторичной обмотки т-ра. Здесь одна полуволна выпрямляется через один анод, а другая—через другой. Зажигающее приспособление (не показанное на чертеже) и здесь должно действовать непрерывно, т.к. через каждые пол периода напряжение падает до нуля. Форма выпрямленного тока показана внизу. Улучшить работу р. в. можно путем включения в цепь постоянного тока дроссельной катушки  $L$  (рис. 163). Под влиянием дроссельной катушки кривая тока делается более пологой (рис. 163 внизу), и получается некоторое наложение волн друг на друга, так что ни в один момент сила тока не будет равной нулю. Тогда зажигающее приспособление после возникновения дуги может быть выключено, и дальше

р. в. будет работать самостоятельно. На практике обычно приходится выпрямлять не однофазный, а трехфазный ток. Это достигается устройством трех анодов (рис. 164, обозначения

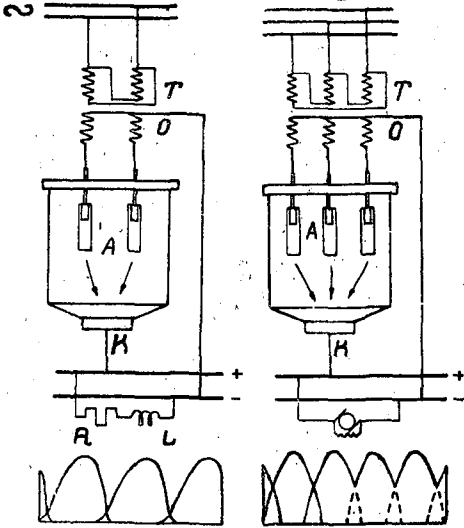


Рис. 163.

Рис. 164.

те же). Как видно из нижнего чертежа, волнистость постоянного тока здесь значительно меньше, чем у однофазного р. в., т. к. отдельные волны перекрывают друг друга. Кроме того, ток, благодаря перекрытию, никогда не падает до нуля, и дуга поддерживается автоматически. Для еще большего сглаживания применяют р. в. шестифазного и двенадцатифазного тока. Схема шестифазного р. в. с шестью анодами показана на рис. 165. Применяя дроссели, можно добиться почти идеального сглаживания. Первоначально р. в. строились стеклянными. Такие приборы к настоящему времени строят до 200 А выпрямленного тока при напряжении

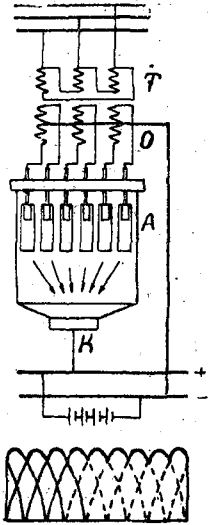


Рис. 165.

до 500 в. Баллон современного стеклянного р. в. для выпрямления трехфазного тока показан на рис. 166. Небольшой отросток слева служит для присоединения зажигающего приспособления. Для получения больших мощностей в настоящее время строят р. в. с стальными баллонами. Главным затруднением при конструировании металлических р. в. является устройство уплотнений в местах ввода электродов и в местах соединения крышек с корпусом. Эти уплотнения в настоящее время изготавливаются либо комбинированными из асбеста и ртути, либо из свинца. Разрез современного металлического р. в. показан на рис. 167.

до 500 в. Баллон современного стеклянного р. в. для выпрямления трехфазного тока показан на рис. 166. Небольшой отросток слева служит для присоединения зажигающего приспособления. Для получения больших мощностей в настоящее время строят р. в. с стальными баллонами. Главным затруднением при конструировании металлических р. в. является устройство уплотнений в местах ввода электродов и в местах соединения крышек с корпусом. Эти уплотнения в настоящее время изготавливаются либо комбинированными из асбеста и ртути, либо из свинца. Разрез современного металлического р. в. показан на рис. 167.

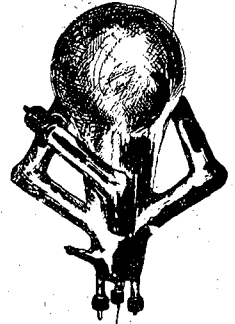


Рис. 166.

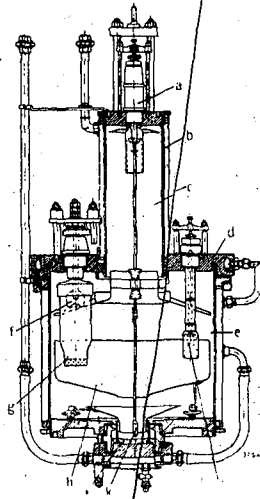


Рис. 167.

Здесь *a*—зажигающее приспособление, *b*—охлаждающая рубашка, *d*—крышка, *e*—рабочий цилиндр, *f*—главный анод, *g*—анодный колпак, предохраняющий анод от зарызгивания ртутью, *h*—кольцо, концентрирующее распространение дуги, *i*—катод, *k*—зажигающий анод, *l*—возбудительный анод. Зажигающее приспособ-

ление показано отдельно на рис. 168. При замыкании выключателя  $d$  постоянный ток от батареи проходит через сопротивления  $R_a, R_z$ , соленоид  $a$ . Соленоид притягивает штангу зажига-

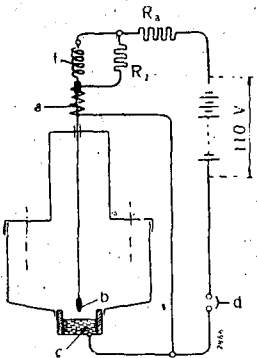


Рис. 168.

тельный анода  $b$ , последний соприкасается с катодом  $c$ , и происходит зажигание, т. к. ток может теперь проходить от батареи и через цепь анода. Т. к. сопротивление этой цепи значительно меньше, благодаря отсутствию  $R_z$ , то через соленоид ток проходить почти не будет, и пружина  $f$  вернет зажига-

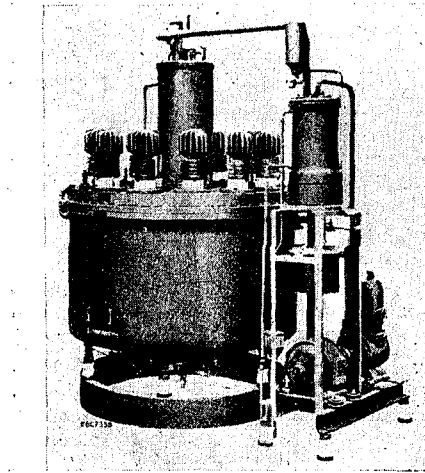


Рис. 169.

охлаждение анодов и поддержание вакуума. Для первой цели аноды снабжают охлаждающими ребрами, а при очень больших мощностях устраивают их полыми и пропускают холодную воду. Для поддержания вакуума применяют особые вакуумные насосы, начинающие работать автоматически при

повышении давления сверх допускаемых пределов. На рис. 169 показан р. в. большой мощности для выпрямления двенадцатифазного тока. Справа установлен вакуум-насос, приводимый в действие электродвигателем. Как и у одноякорных преобразователей, у р. в. существует определенное соотношение между величинами напряжений переменного и постоянного тока. Это отношение для различного числа фаз имеет следующие значения:

Число фаз	1	3	6	12
$V_{av} : V_g$	1,11	0,86	0,74	0,72

Здесь не учтено еще падение напряжения в самой дуге (около 20 вольт) и падение напряжения в дроссельной катушке. Т. к. падение напряжения в дуге приблизительно постоянно и почти не зависит от нагрузки, то к. п. д. р. в. мало изменяется с изменением

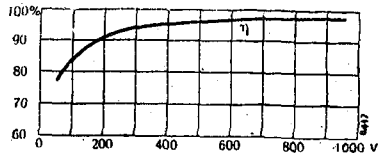


Рис. 170.

нагрузки, но зато сильно зависит от напряжения выпрямленного тока. Чем выше последнее, тем больше и к. п. д. На рис. 170 дана зависимость к. п. д. от напряжения, из которой видно, что

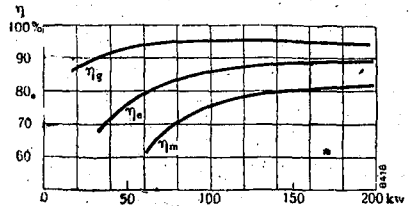


Рис. 171.

при больших напряжениях к. п. д. достигает весьма большой величины (до 98%). На рис. 171 приведены для сравнения кривые к. п. д. р. в. ( $\eta_g$ ), одноякорного преобразователя ( $\eta_e$ ) и мотор-генератора ( $\eta_m$ ) в зависимости от нагрузки. Из чертежа видно, что при недогрузках  $\eta_g$  изменяется мало, тогда как  $\eta_e$  и  $\eta_m$  падают очень резко. Современные р. в. изготавливаются для напря-

жений до 16000 вольт и для токов до 3000—4000 ампер.

**Л и т е р а т у р а.** Для более подробного ознакомления с теорией электрических машин могут служить следующие книги: акад. К. И. Шенфер, „Машины постоянного тока“ (1934); инж. П. С. Сергеев, „Машины постоянного тока“ (1980); проф. Ф. И. Холуянов, „Альтернаторы и преобразователи“ (1933); проф. Ю. С. Четет, „Генераторы и моторы переменного тока“ (1931); проф. Ф. И. Холуянов, „Трансформаторы“ (1934); акад. К. И. Шенфер, „Асинхронные машины“ (1934); акад. К. И. Шенфер, „Коллекторные двигатели“ (1934); инж. Л. Дрейфус, „Коллекторные каскады“ (1934); проф. А. Г. Бельяевский, „Ртутные выпрямители“ (1933).

Ю. Четет.

V. **Электрические станции.** 1. **Классификация.** Э. с. в зависимости от рода используемого энергетического ресурса и рода двигателей подразделяются на: *термические* (сжигающие топливо), *гидроэлектрические*, *ветровые* и проч. Термические в свою очередь подразделяются на: *паровые*, *дизельные* и Э. с. с *газовыми* двигателями. Э. с., снабжающие потребителей не только электроэнергией, но и теплом (в паре или горячей воде), отработанным в первичных двигателях, называются *теплоэлектроцентралями* (см. ниже). В СССР все паровые Э. с. в будущем в большей или меньшей степени будут выполнять задачу централизованного теплоснабжения потребителей ближайшего к ним района. В зависимости от рода топлива паровые станции бывают: *угольные* (в частности *бурогольные*), *торфяные*, *сланцевые* и т. п. В зависимости от назначения Э. с. обычно делят на: *станции общего*, или *общественного пользования* — продающие электроэнергию всем потребителям, находящимся в пределах досягаемости электрических сетей этих станций, и *станции частного пользования*, обслуживающие только одного потребителя, или группу потребителей, для которых они построены. В СССР это подразделение потеряло смысл, поскольку при плановом хозяйстве все Э. с. являются станциями общего пользования, но и в капиталистических странах за последние годы станции частного пользования начинают частично втягиваться в общую систему электроснабжения (см. *электрификация*). Крупные Э. с. общего пользования, обслуживающие большой район, называются *районными* Э. с. В СССР такие станции принадлежат к числу

общесоюзных предприятий. На Западе они принадлежат обычно крупным электроснабжающим обществам, иногда с участием государственного капитала. В СССР Э. с. подразделяются на 3 группы: *районные*, принадлежащие Союзу, *местные* (городские и сельские), принадлежащие республикам, *фабрично-заводские*, к каковой группе относятся также железнодорожные (принадлежат к числу союзных или республиканских, в зависимости от принадлежности того предприятия, в состав которого они входят). В зависимости от роли Э. с. в объединении они подразделяются на: *базисные* (*основные питательные* станции), *полупиковые*, *пиковые*, *резервные*.

2. **Устройство паровых станций.** На всякой паровой Э. с. происходит 6 основных круговых процессов: 1) процесс превращения топлива в углекислоту и в золу; 2) циркуляция воздуха для горения; 3) циркуляция воды и пара в котле и турбине; 4) циркуляция охлаждающей воды; 5) циркуляция охлаждающего воздуха; 6) циркуляция электрического тока.

1) На Э. с., расположенных вблизи мест добычи топлива, последнее часто доставляется в котельную по канатной железной дороге, и около самой станции в этом случае имеется очень большой склад. В случаях доставки топлива по железной дороге склад топлива (открытый или закрытый) устраивается с расчетом на питание станции со склада даже в случае перерыва подвоза угля в течение некоторого времени. Размер склада зависит от местных условий и от свойств топлива. Некоторые виды топлива, как, например, подмосковный уголь, требуют особых мероприятий во избежание самовозгорания. Большие запасы топлива хранятся у торфяных станций, вследствие сезонности добычи; часть этого запаса в открытых штабелях хранится вблизи станции, часть на торфяном болоте. Вопрос о лучшем способе хранения торфа, полученного по методу послойного фрезирования (см. XII, ч. 9, прил. *торф*, 33'/35'), еще не разрешен окончательно (1932). На этот предмет существуют две точки зрения. По одной является необходимым большие шта-

беля фрезерного торфа вентилировать путем устройства внутренних воздушных ходов-вытяжек с целью быстрого отвода образовавшегося тепла. По другому мнению устройство вентиляции штабелей считается нецелесообразным, так как повышение внутренней температуры штабеля, обычно, не доходит до опасно высоких пределов. Повышенные температуры торфа в допустимых границах может быть даже полезным, так как наличие подсушки в небольших границах способствует повышению качества торфа, как топлива. В этом случае, однако, имеется налицо опасность открытого загорания торфа, если во внутренние слои его будет подведен воздух, например если по середине штабеля в период его разогревания будет прокопана канава, так как в данном состоянии торф обладает большой активностью в смысле соединения с кислородом воздуха. В течение суток Шатурская станция им. В. И. Ленина под Москвой, мощностью в 136 мегаватт (тысяч киловатт), потребляет торфа свыше 3.000 т, а Бобринковская на подмосковном угле, мощностью в 300 мегаватт, будет потреблять в сутки до 7.000 т. Эти цифры дают представление о размерах потребной топливоподачи для крупных Э. с. Для подачи топлива в котельную (ср. прил. *паровые котлы*, XXXI, 25 сл.) либо устраивается ленточный или иной конвейер, подымающий топливо на крышу котельной, где оно сваливается в бункера, либо, на очень крупных станциях, по специальной эстакаде под крышу поднимается паровоз или электровоз с составом вагонов или вагонеток, из которых топливо ссыпается в бункера. Топливоподача требует соответствующего развития подъездных путей к станции. В 20-х годах XX-го века стало сильно развиваться, сначала в САСШ, а потом и в Европе *сжигание угля в пылевидном состоянии*, предварительно размолотого в специальных мельницах и подсушенного (см. XLI, ч. 8, 407/08). Применение угольного топлива на станциях требует специального пылеприготовительного устройства. Вначале устраивалось центральное приготовительное отделение для всей станции в отдельном

здании, примыкающем к котельной, позже централизованную систему стала вытеснять индивидуальная, при которой у каждого котла ставятся (одна или две) мельницы для размола угля, при чем уголь в самой мельнице подсушивается топочными газами. Оборудование индивидуального пылеприготовления устанавливается в самой котельной и не требует специального здания. Выбор типа мельницы для пылеприготовительных устройств представляет очень ответственную задачу, в особенности при твердых сортах топлива, как, например, антрацит.

Тихоходные мельницы представляют собою большой железный вращающийся барабан (число оборотов порядка 20 в минуту), частично наполненный шарами из твердого чугуна или телами иной формы. Во время работы в барабан поступает подлежащий перемолу уголь; уже в виде пыли, пройдя через специальные сепараторы, он подается в бункер или непосредственно в топку. Форма чугунных тел, служащих для перемола угля, в процессе перемола не играет большого значения. Характерно, что тихоходные мельницы потребляют одно и то же количество энергии, работают ли они при полной нагрузке или вращаются в холостую. Тихоходные мельницы более надежны в работе, но зато более громоздки. В более быстроходных мельницах (число оборотов порядка 100—200) размол обычно производится также шарами, растирающими топливо, но в этом случае шары ходят по определенной орбите. В быстроходных мельницах (обороты порядка 1.500) размельчение топлива производится гл. обр. ударным действием, с помощью специальных бил, прикрепленных к вращающемуся ротору. Износ бил в быстроходных мельницах очень большой (от 200 до 400 гр. металла на тонну помола), так что необходима их частая замена, что несколько затруднено в том случае, если мельница работает без промежуточного бункера, непосредственно в топку. В виду этого мельницы так устраиваются, что допускают быструю разборку и смену бил в течение около 20 минут. На это время является необходимым перенесение нагрузки котла на другие котлы. Гораз-

до лучше решается вопрос, если для одного котла установлены 2 мельницы, хотя бы и неполной мощности. В этом случае, при выходе из строя одной мельницы, работа котла не останавливается, а только несколько сокращается. Расход электрической энергии на помол угля в зависимости от свойств угля и конструкции мельницы и тонкости помола колеблется в довольно широких пределах, от 12 до 37 квтч на тонну помола. Из известных систем можно указать на конструкции Гардинга и Кеннеди (шаровые тихоходные мельницы), Раймонда и Фуллера (более быстроходные) и Резолютер и Бютнер (быстроходные мельницы). Угольная пыль в виде аэросмеси подается к форсункам с помощью вентилятора по особым рукавам. Угольная пыль горит в топке факелом, дающим такой же эффект, как факел газа или мазута, хотя по существу процесс горения угольной пыли и газа протекает различно. Применение угольной пыли дает следующие преимущества: 1) коэффициент полезного действия котла, как при газовом и жидком топливе, несколько выше, чем при сжигании твердого топлива на решетке; 2) легкая возможность форсировки котла и быстрая растопка; 3) более легкая возможность перехода от одного сорта угля к другому, на мазут и обратно. Применение угольной пыли вызвало появление *водяных экранов* для защиты стенок топки от действия пламени (см. *топки*, XLI, ч. 8, 408/10); в свою очередь водяные экраны значительно увеличивают паропроизводительность котлов. Они стали применяться и при механической решетке, хотя там их применение менее удобно. С появлением водяных экранов техника подошла к задаче увеличения до максимума значения доли тепла, получаемого котлом за счет лучеиспускания.

В связи с трудностями борьбы с уносом пыли из дымовой трубы, что препятствует применению пылевидного топлива на станциях, расположенных внутри города, стали совершенствоваться механические топки. Из них топки „с нижней подачей топлива“, так называемые ундерфидстокеры, по нашей терминологии просто *стокеры*,

успешно конкурируют с пылеугольными топками. В пылевидном состоянии оказалось возможным хорошо сжигать плохие сорта топлива, а также тощие угли и антрациты. В СССР пылевидное топливо применяется широко на новых районных станциях, работающих на подмосковном угле и других бурых углях, а также на антрацитовом штыбе. Стокеры применены на Челябинской районной станции и на небольшой теплоэлектроцентрали на заводе Клейтук в Москве. В последние годы выдвинулся вопрос о сжигании древесных опилок, а также фрезерного торфа путем вдувания их в топку, где частицы дерева или торфа должны сгорать „в взвешенном состоянии“. Был предложен целый ряд конструкций подобных топок (Теплотехнического института, Шершнева и других), но до последнего времени ни одна из этих конструкций, по крайней мере для сжигания фрезерного торфа, не дала еще в эксплуатации вполне надежных результатов, что можно сказать, например, про топки инж. Макарьева для сжигания кусковых сортов торфа. Точное пространство должно быть, примерно на один метр выше при пылеугольном и нефтяном отоплении, а также при сжигании топлива во взвешенном состоянии, чем при сжигании его на механических решетках.

В конце 20-х годов XX-го века стало появляться стремление применять в котлах Э. с. уголь, предварительно *облагороженный* преимущественно *путем полукоксования* при низкой температуре 500-600° С. (см. XLV, ч. 2, 265/66). Реторты для полукоксования ставятся в самой котельной, жидкие потоны перерабатываются на маленьком химическом заводе при станции; полукокс из реторты поступает в мельницу и в пылевидном состоянии сжигается под котлом, газ (*швельгаз*) либо продается на сторону, если имеется сбыт, либо тоже сжигается под котлами (см. описание такой станции, работающей с 1927 г. в Англии, в трудах секционного собрания Мировой энергетической конференции в Токио 1929 г., изд. на английском языке, доклад E. H. Smyth and E. G. Weeks).

Топливо, сожженное под котлами, превращается частично в золу, соби-



рающуюся в зольном подвале под топкой, частью в дымовые газы, которые, отдав свое тепло собственному котлу, пароперегревателю, водяному и воздушному экономайзеру, выбрасываются в дымовую трубу при помощи либо естественной тяги, либо специального дымососа (на крупных современных Э.с. применяется исключительно искусственная тяга; ср. XXXI, прил. *паровые котлы*, 27/29; также *трубы*, XLI, ч. 9, 351'53, и *центробежные вентиляторы*, XLV, ч. 3, 328"). Для защиты окрестностей от угольной пыли в дымовых трубах устанавливают дымоуловители различных типов, базирующихся либо на действиях фильтров, либо водяного экрана, либо электростатического поля. Наиболее эффективными являются последние, но зато и наиболее дорогими.

**Золоудаление** представляет собою сложную процедуру, в особенности в случаях многозольного топлива и топлива с низкой температурой плавления золы. На Бобриковской станции придется удалять в сутки около 1.400 т золы; особенно велик % золы на Э. с., сжигающих горючие сланцы, в которых зольность доходит до 80% (ср. *топливо*, XLI, ч. 8, 412/22). В практике есть целый ряд способов удаления золы из топок — ручное, механическое, гидравлическое и удаление шлаков в расплавленном состоянии. При ручном золоудалении в подзольниковое пространство котла подкатываются по рельсам вагонетки, в которые и высыпается шлак, собравшийся в зольниковых воронках топки и котла. После этого вагонетки вывозятся на место свалки шлака, где и опоражниваются. При механическом золоудалении шлак высыпается на движущийся элеватор или конвейер и таким образом удаляется механическим путем из помещения станции. При гидравлическом золоудалении шлак ссыпается из топок в наклонные канавки, по которым смывается наружу водой. Иногда применяется гидравлическое золоудаление в закрытых трубах под давлением (система Зейферга). За последние годы по идее, возникшей во Франции, в САСШ стало распространяться удаление золы из топки в расплавленном состоянии. Этот способ золоудаления особенно пригоден для

легкоплавких шлаков. Вообще при обычном золоудалении работа с топливом, имеющим низкую температуру плавления золы, весьма затруднена — шлак спекается, прилипает к стенкам и задепляет дымовые проходы в первых рядах труб. В САСШ в настоящее время уже имеется значительный опыт по жидкому шлакоудалению; там на такое золоудаление оборудован целый ряд крупных установок, и видимо можно считать, что основные трудности, встретившиеся при осуществлении этой системы, уже пройдены. Особые затруднения при жидком шлакоудалении, особенно при частых остановках котла, встретились со стороны прочности пода топки, на котором скопляется расплавленный шлак до его удаления. Весьма хорошие результаты получились для пода с охлаждаемой нижней поверхностью. У нас в Союзе жидкое шлакоудаление еще не применялось, но имеются данные к его применению, так как целый ряд наших топлив обладает низкоплавкой золой. Шлаки и зола во многих случаях могут быть использованы как строительный материал, в частности для изготовления шлакоцемента.

2) Параллельно с процессом превращения угля в углекислоту и золу с отдачей тепла воде и пару, в котельной установке происходит процесс циркуляции воздуха, необходимого для горения. Этот воздух поступает из атмосферы в *воздухоподогреватель* (воздушный экономайзер), использующий тепло дымовых газов, и затем идет в топку или естественным путем, или нагнетается туда вентилятором (горячее дутье). В пылеугольных топках нагретый воздух вдувается вместе с пылью. После использования кислорода в процессе горения азот воздуха, вместе с дымовыми газами, возвращается в атмосферу.

3) Пар, полученный из воды в котле, перегревается до заданной температуры в *пароперегревателе* (см. *паровые котлы*, XXXI, прил., 13/14), поступает затем в турбину, расширяясь в ней отдает заключенную в нем потенциальную энергию и поступает в *конденсатор*, где вновь превращается в воду. Эта вода питательным насосом

перекачивается снова в котел, пред-варительно подогреваясь до темпера-туры близкой к температуре испаре-ния при нормальном для данного котла давлении пара. С целью уменьшения до минимума пути циркуляции воды и пара, машинный зал и турбины в нем размещают так, чтобы трубопроводы были возможно короткими. Это при-водит к параллельному расположе-нию машинного зала и котельной. Но существуют и другие схемы. На рис. 1 и 2 показаны схемы принятых в настоящее время расположений: рис. 1

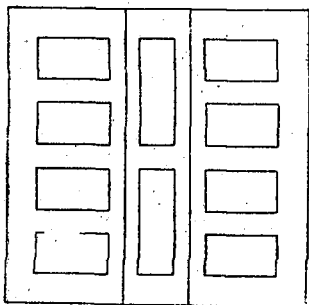


Рис. 1.

представляет расположение машинного зала между двумя котельными, и рис. 2 — взаимноперпендикулярное рас-

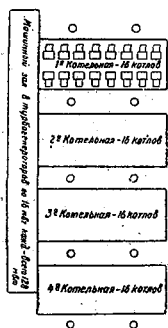


Рис. 2.

положение машинного зала и котельной, применяющееся в тех случаях, когда число котлов велико по сравне-нию с числом турбин. В настоящее время на крупной станции счита-ется нормальным 1-2 котла на турбину. Кроме рабочих кот-лов, обычно преду-сматриваются два резервных: из них один в чистке, а другой в ремонте.

один комплексный агрегат, и стан-ция, построенная по этому принципу, состоит из блоков (секций), предста-вляющих каждая комплексную одно-машинную станцию. Между котлами устраивают для взаимной страховки горизонтальные паровые связи, но в обычных условиях предполагается, что каждый котел работает на свою тур-бину. Эта идея агрегатности в наи-более крайнем выражении была выска-зана впервые в СССР в брошюре ин-женера В. Д. Кирпичникова „Турбоко-тел“ (1929), в которой автор описывал очень оригинальную конструкцию одно-машинной станции с крупным агре-гатом. Далее этот принцип усиленно дискутировался в американской техни-ческой печати, и там уже есть примеры станций, осуществленных к 1933 г. по принципу котел-турбина.

Автор настоящей статьи в своих ра-ботах 1932 г. по вопросам стандарти-зации основного оборудования Э. с. выдвинул идею распространения прин-ципа блочности, или агрегатности, и на теплоэлектроцентрали, для кото-рых задача сложнее в виду несоот-ветствия энергетической мощности турбины электрической мощности гене-ратора. Автор показал, что для осуществ-ления этого принципа у теплоэлек-троцентралей необходимо создать еди-ную систему стандартов конденса-ционных и теплофикационных турбин, при чем части высокого давления тур-бин различных типов по этой схеме долж-ны быть рассчитаны на одинаковый пропуск пара. При соблюдении этого условия котлы сопрягаются хорошо с турбинами любого типа, и каждая стан-ция, несмотря на разнообразие комби-наций турбин различных типов, будет состоять из стандартных блоков. Но если вышеназванное условие не соблю-дено, то распространение принципа агрегатности котел-турбина на тепло-фикационные станции повлекло бы за собою увеличение мощности котельной против необходимой минимальной по-требности. В 1933 г. вопрос о преиму-ществах идеи блочности теплофика-ционных станций, требующей для своего осуществления коренной перестройки всей системы стандартов турбин, ожив-ленно дискутировался в СССР, а в ино-

В мировой энергетической литера-туре с 1929 г. обсуждается вопрос о пре-имуществах построения конденсацион-ных Э. с. по принципу агрегат-ности: котел-турбогенератор, а часто и повысительный трансформатор и линия по этому принципу составляют

странной технической литературе еще не освещался. Этот вопрос имеет большое значение именно в условиях планового хозяйства. Наличие типовых проектов стандартных блоков позволило бы при планировании и проектировании легко выбирать оптимальное сочетание оборудования в сложной энергетической системе, основным элементом которой стала бы не Э. с., а стандартный одноагрегатный блок, техникоэкономические показатели которого были бы заранее хорошо изучены. Тепловая станция превратилась бы в место концентрации стандартных блоков разных типов (см. по этому вопросу книгу „Принципы проектирования типовых электростанций“ коллектива авторов под ред. проф. Сушкина, 1933). В технической литературе 1932 года появились проекты котлов, состоящих с турбогенераторами один общий механизм, как, например, котлы ВЕЛОКС.

Питательная вода перед вводом в котлы подготавливается в специальных установках (см. XXXI прил., *паровые котлы*, 24). Приготовление питательной воды заключается в очистке ее и в подогреве. В котел поступает обычно та же вода, которая вышла из него в виде пара, но, вследствие наличия некоторой утечки, приходится частично добавлять свежую воду. Добавка воды на конденсационных станциях составляет несколько процентов (порядка 5%). На теплоэлектростанциях эта добавка может доходить иногда до 50% и выше, особенно в том случае, когда отправляемый на производство пар не возвращается обратно на станцию в виде конденсата и если на электроцентрали при этом не установлены паропреобразователи для отпускаемого пара. Во избежание образования накипи в котлах питательная вода подвергается иногда химической очистке или проходит через испаритель. Вся вода, поступающая в котел (включая и конденсатор), освобождается от воздуха в деаэраторе для защиты от ржавления внутренних частей котла (коррозия). Явление коррозии особо наблюдается у котлов высокого давления и является весьма опасным, т. к. в сравнительно короткое время может вывести котел из строя.

Вообще вопрос о качестве воды на современных Э. с. и особенно Э. с. высокого давления является вопросом первостепенным. При плохой воде, при невнимательном надзоре за водоприготовлением никогда нельзя быть спокойным за надежную работу станции.

*Подогрев питательной воды* производится или в водяном экономайзере дымовыми газами котла, изредка острым паром из котла, а в последнее время на крупных установках — паром, отобранном из нескольких ступеней турбины: например, при давлении в 7 атмосфер, 0,8 атмосфер и 0,2 атмосферы, а также отработанным паром из испарителя добавочной воды. Пар, отобранный из турбины для подогрева конденсата (регенеративный цикл), отдав свое тепло, смешивается с питательной водой. Регенеративный цикл повышает коэффициент полезного действия установки и в тем большей степени, чем больше число отборов пара. Это объясняется тем, что работа пара, идущего на подогрев питательной воды, аналогична работе пара в теплофикационном процессе. Поэтому вырабатываемая этим паром соответствующая часть электрической энергии требует на выработку квт-ч примерно только 30—35% тепловой энергии, необходимой для выработки квт-ч конденсационной энергии. В обычных условиях для регенерации ограничиваются 2—3 отъемами пара. Подогревая до температуры, близкой к точке кипения, вода поступает в котел и циркулирует в нем между верхним и нижним барабаном, связанными кипятельными трубками. Пар из верхнего барабана или соединенного с ним паросборника переходит в пароперегреватель, расположенный обычно в верхней части котла над или между пучками кипятельных трубок. Перегретый при постоянном давлении пар поступает в турбину. В установках с давлением пара свыше 40 атмосфер, во избежание чрезмерной влажности пара в частях низкого давления турбины, приходится пар, прошедший часть высокого давления в турбине, подвергать *вторичному перегреву* до перехода его в часть турбины низкого давления. В последнее время

появляются конструкции паровых турбин со специальным отводом сконденсировавшегося пара из ступеней низкого давления. Такое устройство турбин позволяет работать с более сырым паром и применение вторичного перегрева производить уже только при более высоких (порядка 80—100 атм.) начальных давлениях пара. Вторичный перегрев осуществляется либо в котле дымовыми газами, либо паром. В некоторых установках, применяющих вторичный перегрев пара, турбина высокого давления отделена от турбины низкого давления и имеет отдельный вал и отдельный генератор. В САСШ, на станции Форда в Детройте, применено 2-этажное расположение турбин: турбина высокого давления со своим генератором располагается над турбиной низкого давления. В целях увеличения термического коэффициента полезного действия установки современной техника стремится к увеличению давления пара и *температуры перегрева*.

В целях наиболее дешевой и надежной выработки пара в последние годы разработан целый ряд новых конструкций паровых котлов. Большинство этих конструкций работает с принудительной циркуляцией воды или пара. Можно указать на котел Бенсона, работающий на критическом давлении (225 атм.) с принудительной циркуляцией воды, котел Леффлера, работающий с принудительной циркуляцией перегретого пара на высоком давлении (порядка 130 атм.), котел Ламонта, в котором применили для поверхности топочного экрана, собственно котла и экономайзера трубки малого диаметра (38 мм) и принудительную циркуляцию воды, а также целый ряд других конструкций. Что касается перегрева пара, то в виду выработки ряда специальных сортов сталей в настоящее время можно применять пар с температурой перегрева до 500°.

В САСШ весьма распространенным и надежным в эксплуатационном отношении считается давление в 100 атм., хотя и там на крупных конденсационных станциях обычно применяется давление порядка 30—40 атм. На европейских силовых установках также

весьма распространяется такое давление. Наряде отдельных промышленных теплоэлектроцентралей в Германии установлены котлы высокого давления (от 60 до 130 атм.) и есть много хороших отзывов о работе этих установок.

В СССР в последние годы на теплоэлектроцентралях начало применяться высокое давление. Имеются 2 установки на 60 атм. (Москва и Березники) и кроме того в Москве построена теплоэлектроцентраль, где установлены котлы А. Леффлера в 130 атм. и прямой котел советской конструкции. Применение высокого давления особенно целесообразно на теплоэлектроцентралях, строящихся на привозном, дорогом топливе. В САСШ в целях повышения коэффициента полезного действия электрических станций за последние годы для работы в тепло-вом цикле пробуют применять пары ртути. Коэф. полезного действия такой станции, работающей на смешанном цикле водяных и ртутных паров, может достигать до 35—37%. В Харфорде уже несколько лет работает такая установка на мощность в 10.000 киловатт. Коэф. полезн. действия этой установки около 31%. За последние годы должны быть вновь установлены еще в двух пунктах такие ртутнопаровые агрегаты, мощностью по 20.000 квт. в каждом пункте. Ртутные пары работают при давлении около 8,5 атм. и 500° С перегрева, при чем в конденсаторе они охлаждаются до температуры 250° С (см. материалы Парижского конгресса 1932 г.). Кроме парортутного цикла, изучаются экспериментально и другие „бинарные“ циклы (с двумя рабочими телами).

4. В конденсационных Э. с., т.-е. не использующих в большом количестве отработанный в турбинах пар для отопительных целей, требуется приблизительно в 60 раз больше воды для охлаждения конденсатора, чем для испарения в котлах. *Водоснабжение* большой паровой станции представляет большие трудности, и во многих случаях именно условия водоснабжения ограничивают мощность, которую можно установить на станции. Возможны 3 схемы водоснабжения: а) вода берется из реки, прогоняется через конденса- торы и спускается обратно; элементом

ограничивающим мощность станции является дебет воды в реке; в некоторых случаях этот способ требует сложных сооружений: для забора воды из реки с меняющимся руслом и с большими колебаниями уровня, а также для подъема воды на нагорный берег реки; б) устраивается искусственный пруд; вода для охлаждения возвращается в тот же пруд и, пройдя некоторое расстояние, искусственно удлиняемое направляющими сооружениями, снова возвращается в конденсатор; ограничивающим мощность станции фактором при прудовом водоснабжении является поверхность пруда, так как от нее зависят условия охлаждения воды; приток свежей воды, обычно, значительно меньше того количества воды, которое проходит через конденсатор; прудовое водоснабжение иногда оазывается более дешевым, чем снабжение станции водой из реки (напр., на Горьковской Э. с. в г. Балахне на берегу р. Волги применяется прудовое охлаждение, несмотря на близость мощной реки); в) нагретая в конденсаторах вода охлаждается в градирнях и вновь возвращается в конденсаторные установки, часть ее испаряется в градирнях и теряется в водопроводах, для ее конденсации подается добавочная вода; последний способ дает худшие условия работы конденсатора, чем первые два, но зато требует значительно меньшего количества воды \*).

Во всех случаях количество воды  $n$ , потребное для охлаждения одного килограмма пара в конденсаторе, зависит от температуры самой охлаждающей воды и температуры, которую должен иметь конденсат, и определяется по формуле  $n = \frac{i_2 - t_k}{t_2 - t_1}$ , где  $i_2$  — теплосодержание отработанного пара в калориях,  $t_k$  температура конденсата,  $t_1$  и  $t_2$  — начальная и конечная температура охлаждающей воды в °С. Во избежание загрязнения конденсатора охлаждающая вода в некоторых случаях подвергается грубой очистке. В Германии с успехом применяется нагретая вода,

\*) В последнее время получает распространение „бризгальное“ водоснабжение (напр., у нас на Кузнецкой районной централи), которое несколько дешевле и лучше, чем градирни, но зато требует больше воды.

вышедшая из конденсатора, для подогрева почвы на огородах около станций с целью повышения урожайности. Эту идею предполагается использовать и у нас.

5. Для охлаждения генераторов производится искусственная вентиляция последних. Воздух для этой цели засасывается извне, очищается воздушным фильтром, проходит затем в генераторы через охлаждательные ходы, а также прорези и осевые каналы в железе статора и ротора и далее выгоняется наружу. Нагретый воздух по желанию может быть направлен или в атмосферу, или в машинный зал для отопления в холодные дни.

В последнее время, гл. обр. в целях предохранения обмоток генератора от загрязнения, стало сильно распространяться охлаждение генератора воздухом, работающим в замкнутом цикле. Воздух, пройдя генератор, по закрытым каналам отводится в специальный холодильник, откуда вновь поступает в генератор.

Возможность увеличения нагрузки генератора ограничивается температурой его обмоток, повышение которой обуславливается омическими потерями в обмотках, пропорциональными квадрату силы тока, и магнитными потерями в железе. При данной конструкции генератора его можно нагрузить тем больше, чем больше охлаждающая среда в состоянии отвести от него тепла в единицу времени. Обычный воздушный способ охлаждения генераторов не является идеальным; есть способы, позволяющие отвести значительно большее количество тепла — это применение либо водяного охлаждения, либо охлаждения с помощью водорода. Охлаждение водой не получило распространения в виду трудности подведения воды в закрытых каналах близко к обмоткам.

В САСШ возникла идея охлаждения генераторов водородом. Водород, как известно, имеет гораздо большую весовую теплоемкость и коэффициент теплопередачи, а кроме того плотность водорода составляет только 7% от плотности воздуха. Эти обстоятельства ведут к более быстрому поглощению и отводу тепла, выделяющегося из обмо-

ток генератора, а также к уменьшению потерь от трения при вращении ротора в воздухе. В итоге получается, что один и тот же генератор при водородном охлаждении можно перегрузить на 25%, не превышая его предельной температуры, что, конечно, имеет большое значение в смысле рациональности использования оборудования. Водород работает в замкнутом цикле и, нагревшись, охлаждается в специальном холодильнике, чтобы затем снова направиться в генератор. Давление водорода поддерживается несколько выше (порядка 0,03 — 0,04 кг/см<sup>2</sup>) атмосферного. Потеря водорода в этом случае составляет совершенно незначительную величину.

Высказывается предположение об опасности применения водорода из-за возможности образования взрывчатой гремучей смеси. Но надо иметь в виду, что водород в смеси с воздухом безопасен до 10% и свыше 70% содержания воздуха. Должны быть исключительно неблагоприятные обстоятельства, чтобы могла образоваться гремучая смесь. В устройствах охладителей, работающих водородом, устанавливаются специальные приборы для наблюдения за составом газа; кроме того, давление водорода выше атмосферного, и это гарантирует от засасывания воздуха внутрь. Перед зарядкой охладителя водородом генератор и холодильник необходимо проудить каким-либо нейтральным газом, например углекислотой. Естественно, что устройство водородного охлаждения, дающего такую большую экономию в генераторе, окупается очень быстро. Что касается конструктивных возможностей устройств водородного охлаждения, то надо сказать, что наличие проходного вала генератора довольно сильно усложняет устройство. Наоборот, в синхронных компенсаторах установка эта весьма проста. В 1932 г. в САСШ были установлены синхронных компенсаторов, работающих на открытом воздухе с водородным охладителем: на 12.500 ква и 20.000 ква.

6. Циркуляция электрического тока, выработанного на станции, в отличие от всех преждеописанных замкнутых круговых процессов, охватывает огромную территорию в сотни и тысячи км.

км. Электрический ток, генерируемый на станции при напряжении, доходившем в 1932 г. до 25.000 вольт (в отдельных случаях; обычно же в крупных установках 6.600, 11.000 или 13.000 вольт), пройдя распределительное устройство частично, а на некоторых станциях целиком, идет при генераторном напряжении в местную распределительную сеть, обычно кабельную, для снабжения электроэнергией местности вблизи станции. У потребителей это напряжение понижается до 6.000 или 3.000 вольт для крупных моторов, 110, 220 или 380 вольт для освещения и мелких моторов (иногда для последних применяется 500 вольт). Пройдя трансформаторы, ток возвращается в генератор, породив во вторичной обмотке трансформатора индуктированный ток другого напряжения, имеющий свой собственный круговой цикл.

Та часть генерированной энергии, которая подлежит передаче на большое расстояние, из генератора направляется на повысительную подстанцию, которая в настоящее время делается обычно открытой. На повысительной подстанции напряжение повышается обычно до стандартных напряжений 115, 220 киловольт, а в последнее время (в САСШ) и до 380 киловольт. В некоторых случаях применяются также и промежуточные напряжения, напр. 154 киловольта. В настоящее время (1932) установлена эксплуатационная надежность напряжения в 380 киловольт, однако данных о результатах длительной практической работы с этим напряжением в литературе еще нет. Ток передается по линиям в центры потребления, где на пониженных подстанциях напряжение доводится до величины, необходимой для питания распределительной сети.

Для коммутации тока служат *масляные выключатели* и *разъединители* (трешальтеры); первые дают возможность размыкать и замыкать сеть под напряжением и под током, последние позволяют производить эти операции только при отсутствии тока. Масляные выключатели, расположенные внутри здания, размещаются во избежание опасности от взрывов в бетонных ящиках. При больших мощностях камеру

выключателя всегда стараются сделать изолированной с выходом наружу или, в крайнем случае, в коридор (взрывные камеры). Этим стараются защитить остальное оборудование распределительного устройства в случаях взрыва масляного выключателя, которые иногда имеют место. Помещение, в котором расположены шины и высоковольтное оборудование, делается недоступным для посторонних лиц. Для приведения в действие механизмов высоковольтного оборудования, которым обыкновенно манипулируют на расстоянии, и для действия защитных приборов применяется постоянный ток, для чего имеется специальная батарея аккумуляторов.

**Возбудители генераторов**, вырабатывающие постоянный ток для питания электромагнитов ротора, обычно насажены на общий вал с генераторами; иногда имеются специальные возбудители, обслуживающие несколько генераторов. Для устойчивости параллельной работы машин станций, обслуживающих совместно сеть большой протяженности, устанавливаются специальные быстродействующие возбудители, способные в случае потребности (при коротком замыкании) в течение долей секунды поднять падающее напряжение, что является необходимым для предупреждения выпадения из синхронизма параллельно работающих на различных станциях генераторов. Для собственных нужд станции электроэнергия получается через специальный щит либо трансформированная от главных, либо от вспомогательных агрегатов, так называемых хаустурбин (турбины домашних нужд). На всякой станции должны быть приняты все меры к тому, чтобы при самых серьезных авариях обеспечивалась в котельной работа питательных насосов и на всей станции снабжение вспомогательных механизмов и освещения электрическим током.

Э. с., имеющие турбины с противодавлением или со значительным отъемом пара для отопительных целей или технологических процессов каких-нибудь предприятий, называются теплоснабжающими Э. с. (*теплоэлектроцентралями*, см. ниже). Как общее

правило, при одинаковом давлении, при одинаковых условиях работы Э. с. большей мощности с более крупными единицами дешевле Э. с. с более мелкими. Эта особенность очень сильно сказывается при мощностях единиц до 10.000 киловатт и изображена графически на рис. 3. При повышении дав-

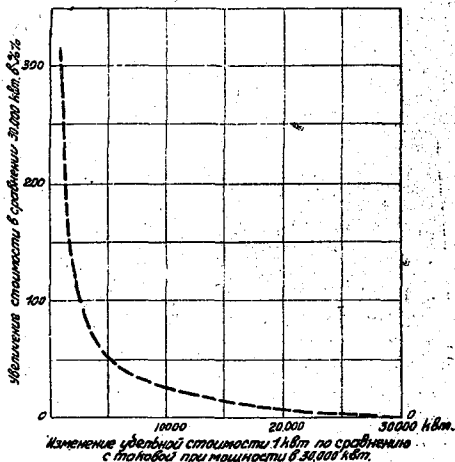


Рис. 3.

ления некоторые части установки значительно удорожаются (в особенности котельная), некоторые, наоборот, удешевляются (меньшее сечение паропроводов, более компактные установки, следовательно уменьшение строительных работ). В 1932 г. вопрос о том, на сколько % 100-атмосферная Э. с. дороже 30-атмосферной, был еще спорным: в литературе встречались указания на удорожание 100 атмосферной установки на 13—15%, по сравнению с 30-атмосферной, а в отдельных случаях в САСШ отмечалось на основании опыта фактически произведенной установки, что в конечном счете 100-атмосферная установка оказалась в отдельном случае не дороже 30-атмосферной. Как общее правило, при прочих равных условиях установка, сжигающая высококалорийное топливо, дешевле, чем сжигающая низкокалорийное топливо, и наиболее дешевой является Э. с., сжигающая мазут или газ. Устройство для приготовления угольной пыли дает удорожание установки на 20—80 руб.

за киловатт. В табл. 1 приведены данные о стоимости установленного киловатта нескольких Э. с., построенных в СССР и за границей.

Таблица 1.  
Стоимость паровых электростанций в рублях на один установленный киловатт.

Страна и название станций.	Род топлива	Мощность в тыс. квт.	Стоимость станции (в руб. на квт.)
Бобриковская им. Сталина (проект) . . . . .	Подмосковн. уголь (пыль)	300	350
Шатурская им. Ленина . . . . .	Торф	136	352
Красный Октябрь . . . . .	Торф	308	396
Шахтинская . . . . .	Антрац. ш.мб. в плещ. видном состоянии	44	345
Новгородская . . . . .	Мазут	12	125
С.-А. С. Ш.			
Из примеров, приведенных без названий Э. с. в докладе L. W. W. Mogrow на 2-ой энергетической конференции в Берлине 1930 г.	Угольная пыль	300	162
		200	242
		1.0	264
Германия			112
Клингенберг, около Берлина . . . . .	Угольная пыль	270	(241 пер. мар.)

*Дизельные станции* по своему устройству проще, чем паровые. Они значительно компактнее и не требуют столь больших количеств охлаждающей воды. Для небольших Э. с. дизеля (см. XVIII, прил. *двигатели внутреннего сгорания*, 9' сл.) являются очень экономичными первичными двигателями, и они дают стоимость энергии обычно ниже, чем паровая станция. При больших мощностях положение меняется. Как известно, дизеля строятся на предельно малых мощностях сравнительно с мощностями паровых турбин, а именно: в 1932 г. наибольшая мощность дизельагрегата на Э. с. была 10.000 киловатт. Коэффициент полезного действия дизельных станций значительно выше, чем таковой для небольших паровых станций, но станции высокого давления с вторичным подогревом пара и регенеративным процессом дают уже коэффициенты полезного действия, приближающиеся к дизельным. Одним из больших преимуществ дизельной станции является быстрый пуск ее в ход в случае необходимости. Это делает ее вполне пригодной для роли пиковой станции, но высокая стоимость дизелей очень неблагоприятна для работы их с малым числом часов использования. В условиях СССР дизельные станции применяются и будут применяться там, где еще не осуществлена централизованная схема электроснабжения, в особенности

в безводных местностях. Однако, в виду крайней ограниченности мировых запасов нефтетоплива надо вообще избегать применять дизеля на Э. с., оставляя их применение там, где они незаменимы, например на транспорте. Очень интересна задача перевода дизелей на пылевидное топливо, над чем работает в Германии ученик Дизеля — Павликовский. Сам Дизель свой двигатель предназначал первоначально именно для работы на угольной пыли, но, встретив трудности, перешел на нефть. Дизельные станции, как и паровые, строятся с использованием отработанного тепла. Так, напр., вода, охлаждавшая цилиндры, используется для бани, или прачешной, или другого потребителя горячей воды; отработанные газы — для подогрева той же охлаждающей воды для отопительных целей или для работы испарителя. Отработанные газы газовых двигателей на металлургических заводах часто применяются для нагрева специальных котлов, водяной пар которых работает в турбинах низкого давления. Так создаются смешанные станции с паровыми турбинами и двигателями внутреннего сгорания (в том числе и дизелями).

Из *термических станций*, основанных на принципе использования в качестве источника энергии существующих в природе тепловых перепадов небольшой величины, отметим проект французов Клод и Бушера



(Claude et Boucherot) построения на острове Кубе Э. с. полезной мощностью 40.000 квт. Предполагается использовать разность температуры воды на поверхности моря в тропиках (от 26 до 29° С) и на глубине 1.000 м, с какой-либо глубины по металлической трубе длиной в 1.800 м и диаметром в 10 м накачивается в резервуар вода при температуре 5—6° С. Роль котлов исполняют испарители, в которых специальными насосами поддерживается вакуум. Вода с поверхности моря, поступающая в испаритель, превращается под вакуумом в пар давления 0,034 атм. при 26° С. Этот пар срабатывается по проекту в турбинах специальной конструкции, испытанной изобретателями на опытных установках малого масштаба. Отработанный пар поступает в конденсатор, где охлаждается водой, поднятой с глубины моря. Расход теплой воды при указанной мощности установки — 140 м<sup>3</sup> в сек., расход холодной воды — 75 м<sup>3</sup> в сек. По проекту 8 турбин приводятся в движение 4 генератора трехфазного тока по 12.500 квт., из суммарной мощности которых 10.000 квт. расходуется на работу насосов, поддерживающих вакуум и поднимающих холодную воду с глубины. Стоимость установки без участка земли, повысительной подстанции и линий передач около 200 руб. на квт. (см. фр. журнал *Revue Générale d'Electricité*, 12/XI, 1932).

С 1930 г. появились в технической литературе описания проектов установок для арктических стран, использующих для получения электроэнергии разность температур холодного воздуха зимой и воды под ледяным покровом. В качестве рабочего тела для первичных двигателей этих проектов предлагаются вещества, имеющие более низкую точку кипения, чем вода (близкую к 0°С и ниже). Такие проекты могли бы иметь практическое применение в СССР (установки Борнео).

О гидроэлектрических станциях см. XIV, 519/20, прил. *гидротехнические сооружения*. В настоящее время, в виду крайней условности подразделения гидроэлектростанций на станции низкого, среднего и высокого давления, было бы правильнее классифицировать их в

зависимости от применимости того или иного основного типа турбин: станции низконапорные, в которых применимы *пропеллерные турбины* (в 1929 г. на конференции в Токио предельным напором для этих турбин назывались 18 и 23 м); станции среднего напора, для которых рационально применять *турбину Френсиса* (на конференции в Токио предел назывался 290 м); станции высоконапорные, те, на которых можно применять только активные турбины (*колесо Пельтона*). О турбинах см. *турбины*, ХLI, ч. 10, 45 сл.

Гидроэлектростанции могут быть разделены на станции, в которых *напор создается искусственно* плотиной, и на станции, *использующие естественный напор*, путем туннеля или деривационного канала. Плотины в станциях второго типа служат гл. обр. для создания водохранилища и направления воды в водоприемные сооружения. На конференции в Токио (1929) было сообщено на основании изучения практики строительства гидроэлектростанций в САСШ и Канаде, что наиболее дешевый установленный квт. имеют гидроэлектростанции, использующие напоры от 25 до 30 м. В СССР из всех построенных, строящихся или запроектированных гидроэлектростанций наиболее дешевый установленный киловатт оказывается у Днепровской (напор 37 м). Это не исключает возможности постройки особо дешевых гидроэлектростанций при использовании очень большого падения в горах без чрезмерно сложных сооружений (эти условия имеются, например, в Норвегии), но, обычно, в этих условиях станции сравнительно маломощны. В 1929 г. на конференции в Токио отмечалось, что турбина Каплана (пропеллерная с поворотными лопатками) практически завоевала всю область низконапорных гидроэлектростанций. Наибольшая мощность турбин Каплана в этом году была 37.500 л. с. при напоре около 11 м. 4 такие турбины строились для станций Рербург Шверштадт на Рейне и столько же для Нижне-Сви́рской станции (Ленинград). Для примера современной гидроэлектростанции с искусственным и естественным напором приводим краткое описание схемы, выстроенных в 1932 г. Днепровской имени В. И. Ленина и

Рионской гидроэлектростанции. У Запорожья (б. Александровск) остров Хортица, на котором некогда была Запорожская Сечь, разделяет Днепр на 2 русла: Старый Днепр и Новый Днепр. Неколько выше Хортицы построена плотина, создающая напор в 37 м. Плотина изогнута против течения. Длина ее около  $\frac{3}{4}$  км. На правом берегу к плотине примыкает здание гидроэлектростанции, на левом располагается шлюзовая лестница с тремя камерами. За плотиной образуется мощное водохранилище. Подъем воды распространяется на 100 км вверх по реке, и в Днепропетровске (б. Екатеринослав) на расстоянии 82 км от плотины еще ощущается подъем грунтовых вод. Все пороги между Запорожьем и Днепропетровском, в том числе и знаменитый Ненасытецкий, перекрыты на высоту достаточную для сплошного судоходства. Так, обр., Днепростроем решается не только энергетическая, но и важная транспортная проблема. Впереди здания станции расположена открытая повысительная подстанция. Через плотину сделан мост. Между плотиной и Запорожьем через оба русла Днепра перекинуты железнодорожные мосты взамен затопленного Кичкасского.

Объем работы по строительству характеризуется следующими цифрами: бетонной кладки всего около 1.150.000 т, земляных работ—600.000 т, а скальных—400.000 т. В октябре 1930 г. на Днепрострое установлен новый мировой рекорд месячной кладки бетона (110.500 т, вдвое больше предыдущего американского рекорда). Турбины типа Френсис по 90.000 лощ. сил каждая при 88 оборотах в минуту, фирмы Ньютон Ньос в САСШ. Пять генераторов по 62.000 квт. заказаны в Америке и четыре делаются в СССР ВЭО на ленинградском электромашиностроительном заводе „Электросила“. Последние три агрегата устанавливаются не сразу, в течение первых 1—1½ г. эксплуатации. Днепровская ГЭС им. Ленина дала первый промышленный ток 1 мая 1932 г. и торжественно открыта 10 октября 1932 г. Стоимость Днепровской станции по смете: размер капитальных затрат на все сооружение при 6 агрегатах—202,7

млн. руб., при 9—217 млн. руб. Из них на жел.-дор. строительство и мосты через Днепр—19 млн. руб., стоимость строительного оборудования, остающегося после постройки—17 млн. руб., линий электропередач и подстанций комбината—10 млн. руб. Так обр. на аппарат производства энергии и судоходства затрачивается сумма кругло 157 и 171 млн. руб. Соответственно стоимость установленного киловатта составляет 423 и 307 руб. по смете (фактически, примерно, на 30% выше, т.-е. кругло 550 и 400 руб.). Так как при сравнении с паровой станцией надо к стоимости последней прибавить капитальные затраты на добычу и транспорт угля, можно отметить, что установленный киловатт Днепровской гидроэлектростанции в общем дешевле, чем таковой на паровых станциях с учетом их топливной базы. Для исчисления стоимости энергии Днепровской станции на капитальные затраты при постройке первой очереди начисляется 60% сложных за время постройки. Если дальше считать 6% на капитал и фактическую амортизационную квоту для каждой части сооружения, то стоимость одного киловатт-часа получается около одной копейки. Средне взвешенная стоимость энергии Днепровской и паровой станции в Западном кольце составит у потребителя около 1,5 коп. при суммарном производстве энергии порядка 5 миллиардов квт-ч., из которых 2,9 млрд. вырабатывает Днепровская гидроэлектростанция.

Рионская гидроэлектрическая станция, мощностью в 40 т. квт., расположена у подошвы южного склона Сагорийского плато близ железнодорожной станции „Рион“ в 10 км от г. Кутаиса. Вода для станции забирается из р. Рион в 1½ км выше цепного моста в г. Кутаисе, проходит через штольню длиной 1.440 м, которая переходит далее в деривационный канал, протяжением 7,8 км. Путем расширения канала, на части его длины образуется бассейн суточного регулирования. Канал примыкает к напорному бассейну, от которого отходят 4 напорных трубопровода, подающие воду к турбинам станции; вышедшая из турбин вода отводящим каналом, длиной 0,8 км,

выводится в реку Квирилу, приток р. Рион. Располагаемый на станции напор брутто равен 67,58 м, полезный напор максимум 61,8 м, минимум—59,8 м. Для захвата воды перед водоприемником возведена плотина, создающая подпор в 9,8 м над уровнем низких вод. Высота плотины над дном около 11 м, а длина по гребню—115 м для пропуска наибольшего паводка 2.335 м<sup>3</sup> в секунду. В плотине имеются 4 отверстия, разделяемые между собою быками и закрываемые двойными щитами, которые поднимаются и опускаются с помощью лебедок, установленных на верхнем крытом мостике; справа от верхних отверстий к плотине примыкает сифонный водосброс. Для пропуска плотов устроен плотоход, шириною в 7,5 м. Выработка электроэнергии, возможная на Рионск. станции при неограниченном графике, составляет 300 млн. квт/ч. Турбогенераторы для Рионгэе выполнены в Ленинграде.

**Стоимость гидростанций.** В табл. 2 показана стоимость нескольких гидростанций, построенных и строящихся

Таблица 2.

Стоимость гидростанций на установленный квт. в рублях (по оценке 1929-30 г.)

Название станции	Напор в м	Мощность в мвт	Стоимость на квт.
Днепровская	37	558 (572)	307 (423)
Земовчальская	23	37	515
Рионская	60	41	565
Свирикан	12	96	1.165
Волховская	11	58	1.220
Северо-Американские по докладу Морроу на Берлинской конференции 1930 г.			

от . . . . .	181 (70 долларов за лощ. силу)
до . . . . .	1.050 (400 долларов за лощ. силу)

в СССР. При сравнении стоимости электрических и паровых станций с народнохозяйственной точки зрения надо иметь в виду, что для сравнимости надо, с одной стороны, учесть условия работы гидростанции, которая зависит от режима реки, а с другой

стороны—то обстоятельство, что гидростанция заменяет собою не только паровую станцию, но и топливную базу последней, почему к капитальным затратам на постройку паровой станции необходимо прибавить капитальные затраты на добычу и транспорт топлива.

**Эксплуатация Э. с.** На рис. 4 показан график потребляемой мощности от Э. с.

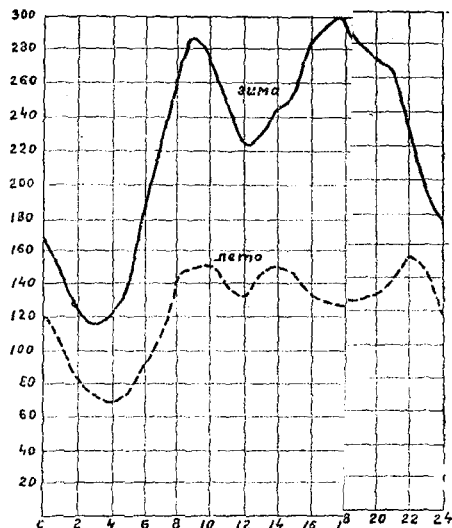


Рис. 4.

в течение суток, а на рис. 5—р течение года. Если станция выработала  $A$  квт/ч. в течение года, то средняя часовая нагрузка станции составляет  $A : 8760 = L_n$  квт. Отношение  $\frac{L_n}{L_m}$  (средней нагрузки к максимальной мощности  $L_m$ ) называется **коэффициентом нагрузки**, отношение  $\frac{L_n}{L}$  (средней нагрузки к установленной мощности  $L$ ) называется **коэффициентом использования** установленной мощности станции. Показатель нагрузки и показатель использования могут быть выражены в часах, путем умножения на 8760. Показатель нагрузки, выраженный в часах,  $h_n$  получается также путем деления выработанных за год квт/ч. на максимум нагрузки:  $h_n = \frac{A}{L_m}$ , а показатель использования, выраженный в часах,  $h$  получается путем

разделения выработанных за год квт/ч. на установленную мощность:  $h = \frac{A}{L}$ .

Физический смысл показателей  $h_m$  и  $h$  — число квт/ч., получаемых за год от каждого квт в среднем. Коэффициент  $h$  (стоимость израсходованного топлива в расчете на один выработанный квт/ч.) зависит от коэффициента использования (подробнее об элементах стоимости электроэнергии и зависимости их от кривой нагрузки Э. с., суточной и годовой, см. проф. Г. Клингенберг, „Сооружение крупных электростанций“, 2 русских издания: Ленинград под редакцией проф. Дмитриева, и Москва под ред. проф. Угримова, 1927, т. 1)

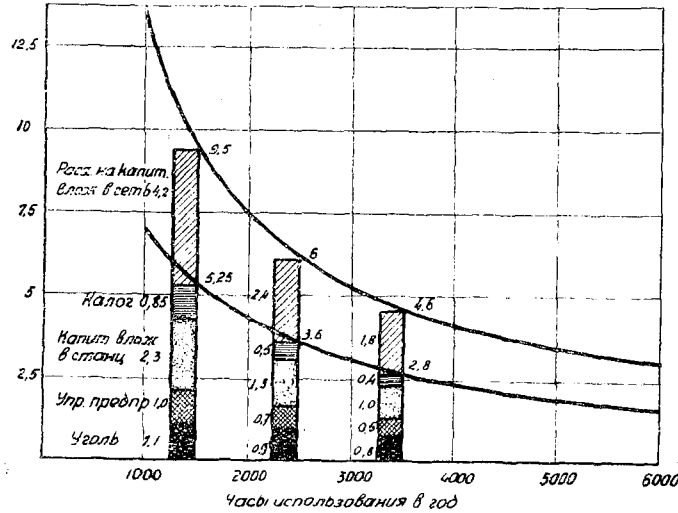


Рис. 5.

коэффициент использования является одной из важнейших характеристик работы Э. с., так как от него в значительной степени зависит стоимость энергии. У гидростанций, имеющих очень маленькие переменные расходы и большие постоянные расходы (главным образом % на капитал и амортизацию), можно считать стоимость энергии обратно пропорциональной коэффициенту использования. Влияние коэффициента использования на стоимость энергии паровой станции показано на рис. 5а. К постоянным расходам на паровую Э. с. нужно отнести также стоимость топлива, затрачиваемого на холостой ход станции, поэтому даже топливная слагаемая себестоимости электроэнер-

гии (стоимость израсходованного топлива в расчете на один выработанный квт/ч.) зависит от коэффициента использования (подробнее об элементах стоимости электроэнергии и зависимости их от кривой нагрузки Э. с., суточной и годовой, см. проф. Г. Клингенберг, „Сооружение крупных электростанций“, 2 русских издания: Ленинград под редакцией проф. Дмитриева, и Москва под ред. проф. Угримова, 1927, т. 1)

В СССР себестоимость электроэнергии рассчитывается без % на капитал, но продажная стоимость получается прибавлением к себестоимости прибыли от начисления 6% на вложенный капитал. Раньше учитывались и % во время постройки, которые прибавлялись к затраченному капиталу. Амортизационная квота за-

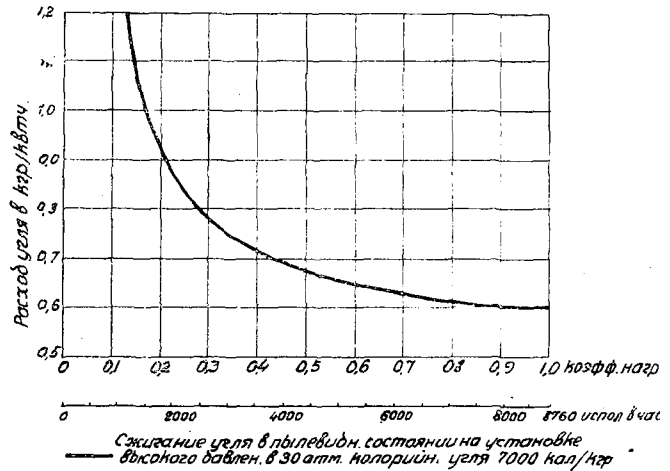


Рис. 5а.

зависит от типа станций и колеблется в пределах от 2% до 8%. Различают себестоимость электроэнергии на шинах станции, учитывающую только расходы

станции, учитывающую только расходы

на производство электроэнергии, себестоимость на шинах высокого напряжения понизительной подстанции, учитывающую еще стоимость передачи электроэнергии от станции до потребителя, и, наконец, стоимость электроэнергии на шинах низкого напряжения у потребителя, учитывающую все расходы по производству, трансформации и распределению энергии. Стоимость электроэнергии на шинах станции нужна для сравнения при выборе типа станций. Стоимость электроэнергии \*) на шинах повысительной или понизительной подстанции потребителя кладется в основу расчетов с потребителями за проданную им энергию. Для грубых расчетов можно в условиях СССР считать стоимость электроэнергии (в копейках на квт/ч.) для гидро-

станций:  $\frac{11 K}{H}$ , где  $K$ —стоимость установленного киловатта в рублях и  $H$ —число часов использования установленного киловатта в течение года.

Для паровых станций:  $\frac{20 K}{H} + b$ , где  $b$ —расходы на квт/ч., зависящие от стоимости топлива и коэффициента полезного действия станций и равные:  $\frac{c \cdot a}{q}$ , где  $c$ —коэффициент, зависящий от коэффициента полезного действия станций и колеблющийся в пределах от 3,5 до 6 (в среднем может быть принят 5),  $a$ —стоимость тонны топлива в копейках,  $q$ —калорийность топлива в калориях на кг. Вышеприведенные формулы годятся только для очень приближительных расчетов, так как не учитывают осложняющих моментов, например: среди капитальных затрат есть такие, которые возвращаются после постройки, например стоимость строительного оборудования; среди постоянных расходов имеются расходы административные и расходы по распределению электроэнергии между потребителями, которые не учтены.

\*) Включая 6% на капитал (т. наз. „соцнакопление“). Себестоимость в условиях социалистического хозяйства должна рассчитываться без этих начислений, и для ориентировочного расчета себестоимости энергии в копейках на киловатт/час надо из нижеприведенных цифр 11 и 20 в формулах вычесть 6, приняв 5 и 14. Для очень крупных гидростанций следует принимать соответственно 1 и 3.

Методы тарификации электроэнергии очень разнообразны. Во всех странах мелкий потребитель со сравнительно малым числом часов использования установленной у него мощности, как, например, домашнее освещение, платит значительно больше, чем крупный потребитель с большим числом часов использования.

Нижеследующая таблица показывает соотношение средних тарифов для отдельных групп потребителей в нескольких странах:

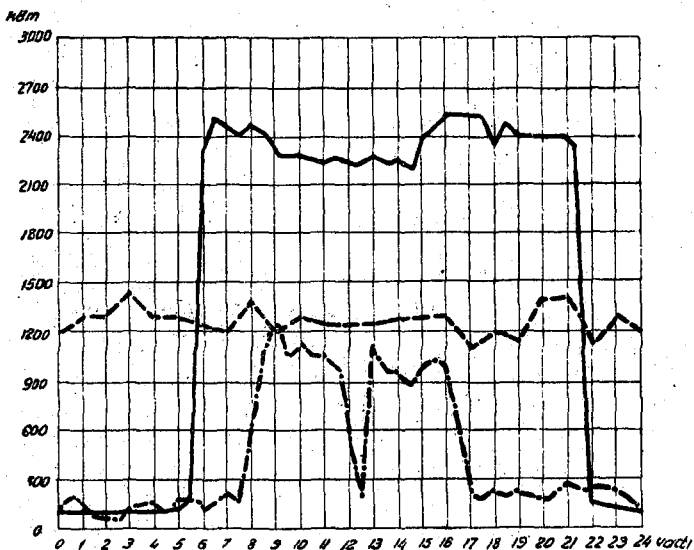
	С.-А. С. Ш. 1928 г.	Англия	СССР (районн. станции) 1928/29
Промышленный потребитель	2,8 коп квт/ч.	4,0	4,7
Торговый потребитель	8,8	—	—
Квартирный абонент	12,7	17,3	18,0

Характер нагрузки отдельных потребителей имеет, несомненно, большое влияние на стоимость его обслуживания. На рис. 6 показаны несколько характерных кривых суточной нагрузки на различных заводах. Чисто осветительная нагрузка дает кратковременный вечерний пик и несколько меньший—утренний. Ради этих пиков приходится устанавливать на станциях, имеющих большую осветительную нагрузку, машины, которые используются только в течение короткого срока в году, или прибегать к другим дорогостоящим способам, указанным ниже.

Условия использования электроэнергии потребителем, конечно, имеют большое влияние на фактическую стоимость его снабжения электроэнергией. В европейских и американских технических журналах приводились разнообразные методы расчета фактической стоимости энергии у потребителя в зависимости от его графика нагрузки, в частности от участия или неучастия в максимуме нагрузки станции, числе часов использования и т. п. Однако, все эти способы очень сложны и трудно построить, базируясь на них, рациональную систему тарификации электрической энергии, учитывающей все

факторы и позволяющей продавать энергию по фактической стоимости. На Западе очень крупным потребителям энергия продается часто по цене, устанавливаемой на основании подсчета фактической себестоимости электроэнергии от собственной электростанции, если бы данный потребитель снабжался сам. Для остальных потребителей существуют очень разнообразные тарифы, которые можно свести к трем основным типам, применяемым и у нас в СССР. Они отличаются между собой по существу тем

читель силы тока, который проще и дешевле электрического счетчика. Расчет по киловаттгоду очень удобен для гидростанции в виду практически почти полного отсутствия на ней расходов, зависящих от размера потребления, если только станция не работает с паровым резервом. Тариф, учитывающий только мощность, стимулирует увеличение потребления энергии потребителем, но станция в этом не заинтересована, так как доходы ее не зависят от размера потребления. Фактически тариф выгоден для потреби-



— Наро-Фоминская текстильн. ф-ка  
 - - - - - Цемзавод «Красный Строитель»  
 . . . . . Ленинградский металлургический завод.

Рис. 6.

показателем, который положен в основу расчетов потребителя с электроснабжающим обществом. 1) Тарифы, базирующиеся только на установленной у потребителя мощности. К ним относится оплата «киловаттгода», покупаемого у гидростанции, плата за лампочку, за мощность моторов и т. п. Сюда же надо отнести системы оплаты за электрическое освещение по площади пола освещаемого помещения. Во избежание злоупотреблений иногда при таких системах тарификации у потребителей устанавливается ограни-

чения установленной мощности энергия у потребителя удешевляется, а доходы станции (паровой) уменьшаются или остаются без изменения (у гидростанции), при расчете по счетчику увеличение использования у абонента мощности увеличивает доходы станции, но не дает никаких выгод абоненту. С целью усиления потребления электроэнергии в ночное время многие общества устанавливают двойные тарифы, при которых в известные часы суток потребленный киловаттчас стоит дешевле, чем в обычное

увеличении использования установленной мощности энергия у потребителя удешевляется, а доходы станции (паровой) уменьшаются или остаются без изменения (у гидростанции), при расчете по счетчику увеличение использования у абонента мощности увеличивает доходы станции, но не дает никаких выгод абоненту. С целью усиления потребления электроэнергии в ночное время многие общества устанавливают двойные тарифы, при которых в известные часы суток потребленный киловаттчас стоит дешевле, чем в обычное

время. Можно сделать переход от одного тарифа на другой автоматически, путем изменения скорости дисков всех счетчиков по сигналу, посланному со станции (например, путем изменения частоты тока). Двойные тарифы применяются также для стимулирования потребления электроэнергии в домашнем быту для иных целей, кроме освещения, путем установки отдельных счетчиков для осветительной цели и для сети, от которой работают другие приборы. Два счетчика применяются очень часто для отдельного учета электроэнергии, потребленной на освещение и для электродвигателей, причем последняя оплачивается дешевле за квт/ч., чем первая. 3) Тариф базируется одновременно на установленной у потребителя мощности и на потребленной им энергии. При этом для оплаты за энергию применяются одновременно 2 ставки: постоянная оплата, не зависящая от размеров фактического потребления, за каждый установленный киловатт или киловольтампер трансформаторов (напр., 3 руб. в месяц за один киловольтампер в Ленинграде для крупной промышленности в 1930 г.) и некоторая небольшая оплата за квт-часы на основании показаний счетчика (напр., 3 коп. за квт/ч.). Ставка оплаты установленного киловольтампера определяется с расчетом покрыть все расходы станции, независимые от размера потребления (постоянные расходы), а ставка оплаты квт/ч. устанавливается с расчетом покрыть все расходы станции, зависящие от потребления (переменные расходы). Эта система тарификации стимулирует улучшение использования установленной мощности. Достижения в этом отношении выгодны как для потребителя, так и для станции. В СССР этот тариф называется «дифференциальным» и применяется для расчетов крупных и средних промышленных предприятий с районными станциями. Рекомендуется применять с целью улучшения коэффициента мощности специальные счетчики, учитывающие безваттную индуктивную составляющую (синусные счетчики), в зависимости от показаний которых каждый месяц вводится известная %-я надбавка, в случае если коэффи-

циент мощности ниже обусловленной в договоре со станцией величины, или определенная %-я скидка, если коэффициент мощности был выше обусловленного. Для мелких потребителей тариф, базирующийся на учете 2 х показателей — мощности и энергии — слишком сложен, взамен него многие общества устанавливают 2 или несколько ставок при оплате по счетчику, например: по 16 коп. за первые 25 квт/ч. в месяц, по 10 коп. — за следующие 25 квт/ч. и по 5 коп. за потребление сверх 50 квт/ч. в месяц. Первая ставка учитывает постоянные расходы станции, вторая и в особенности третья — почти только добавочные переменные. Таким образом тариф с двумя или несколькими ставками за квт/ч., в зависимости от размера потребления, а также такие тарифы, при которых обуславливается в договоре определенный минимум потребления (напр., столько-то копеек за квт/ч., но не менее чем столько-то рублей в месяц), относятся к той же группе тарифов, стимулирующих улучшения использования установленной мощности и учитывающих одновременно и мощность и энергию.

На второй мировой конференции в Берлине (доклад Морроу) отмечено, что в САСШ по мере развития централизованного электроснабжения и соединения сетей отдельных обществ между собою происходит процесс уравнения тарифов на электроэнергию в отдельных частях страны. При социалистическом хозяйстве возможно иметь одну единую систему тарификации электроэнергии независимо от места расположения потребителей, подобно тому, как существует одинаковая, независимо от местности, система оплаты услуг почты, телеграфа и железнодорожного транспорта. В наших условиях возможно положить в основу тарификации другие принципы, чем перечисленные выше. Так, напр., для Днепровского комбината установлена система тарификации, учитывающая роль электроэнергии как ценообразующего фактора в себестоимости продукции предприятий. Исходя из этого принципа, для алюминиевого завода установлена стоимость электроэнергии 0,5 коп. за

квт/ч., т.е. ниже средней стоимости энергии Днепровской гидроэлектростанции, для химических заводов—0,75 к., т.е. величина почти равная стоимости; для завода электролитической стали—1,2 коп., для металлургического завода—1,5 коп., и то и другое выше средней стоимости. Такая дифференциация ставок за квт/час проводится с расчетом покрытия средней себестоимости энергии, полученной от гидроэлектростанции, плюс начисления на затраченный капитал. Возможно, что в будущем применение принципа тарификации электроэнергии по платежеспособности потребителя распространится во всесоюзном масштабе. При этом мыслимо сохранение формы оплаты энергии, при которой стимулируется улучшение использования установленной мощности и коэффициента мощности.

*Дозоды* электростанции обыкновенно составляют только от 20 до 30% от вложенного капитала вследствие того, что электростанции являются предприятиями с очень высоким органическим строением капитала.

*Совместная работа гидроэлектростанций с паровыми.* Вследствие зависимости работы гидроэлектростанций от режима реки, возможны 2 способа использования водотока с максимальной эффективностью: 1) использование гидроэлектростанций для снабжения энергией таких потребителей, которые могут приспособить свое потребление к сезонным колебаниям водотока; естественным сезонным потребителем является ирригация; однако, имеются некоторые электрохимические и электрометаллургические производства (выплавка ферромарганца), которые допускают в широких пределах сезонное колебание производства; 2) совместная работа гидроэлектрической станции со вспомогательной паровой, которая работает в период маловодья и останавливается в многоводный период. Часто бывает экономически целесообразно комбинировать оба способа. Наличие водохранилищ для суточного регулирования, а в особенности для сезонного, позволяет значительно повысить минимальную гарантированную мощность станций. В горных местностях иногда удается создавать в верховьях рек резер-

вуары для многолетнего регулирования, позволяющие обеспечить нижележащим станциям такую же свободу использования установленной мощности, какую имеют паровые станции. При наличии таких водохранилищ вспомогательная паровая мощность не нужна. Можно обойтись без вспомогательной паровой мощности (называемой часто у нас неудачно „паровым резервом“) в случаях, когда удастся соединить для совместной работы гидроэлектростанции на реках, отличающихся своим режимом (напр., в Армянской ССР гидроэлектростанция на р. Дзоргет с ледниковым питанием и летним максимумом будет работать совместно с гидроэлектростанциями на р. Занге, вытекающей из оз. Гюкча и используемой для орошения, имеющей поэтому зимний максимум). Выбор установленной на гидроэлектростанции мощности зависит от условий ее использования, т.е. от характера и размера потребления энергии, а также от наличия тепловых станций, с которыми она будет работать. Как общее правило, для станций, имеющих суточное регулирование, установленную мощность целесообразно иметь раза в три больше, чем минимальная гарантированная мощность. В отдельных случаях в зависимости от режима реки и условий регулирования могут быть значительные отступления от этой цифры. Исключительно хорошие условия создаются для гидроэлектростанции, если она работает на мощную сеть, питаемую другими станциями, при чем потребная мощность сети превышает установленную мощность гидроэлектростанции. При таких условиях можно использовать эффективно всю воду, могущую пройти через турбины. Капитальные затраты на строительство паровых станций в объединении получаются наименьшими при таком использовании гидроэлектростанции, при котором она, даже в маловодные периоды, хотя бы на короткое время развивает большую мощность, покрывая пики нагрузки, т.е. когда она работает только в часы максимального потребления, а в остальные часы накапливает воду в водохранилище. В Ленинграде Волховская гидроэлектростанция в зимнее время покрывает *верхнюю*



часть графика и играет роль пиковой станции, а в летнее время покрывает нижнюю часть графика и является базисной станцией. При включении гидростанций в очень большую систему с паровыми электростанциями можно пользоваться сезонным приростом мощности гидростанций для замены ремонтирующихся паровых агрегатов (см. брошюру С. А. Кукель-Краевского, „Плановый ремонт агрегатов электроснабжающей системы в зависимости от графика нагрузки и структурного состава системы“, 1932). При совместной работе гидростанций с теплоснабжающими электростанциями (теплоэлектроцентралями) надо иметь в виду, что гидроэнергия, как общее правило, должна заменять собою только ту энергию, которую без нее пришлось бы вырабатывать конденсационными частями электростанций, и не должна снижать выработку электроэнергии по тепловому графику, которая получается с очень незначительным дополнительным расходом топлива. Мощность включаемой в систему гидростанции не должна заменить мощность тех теплофикационных агрегатов, которые покрывают тепловой график, и может заменять только чисто конденсационные агрегаты и конденсационные части теплофикационных агрегатов полуконденсационного типа (с конденсацией и отбором пара).

При социалистическом хозяйстве имеются широкие возможности регулирования условий потребления энергии и допустимо значительно увеличивать установленную мощность гидростанций, включаемых в крупные электроснабжающие системы, против гарантированной круглый год мощности и притом без дублирования паровых и гидравлических мощностей. Таким образом старое понятие о „паровом резерве“ для гидростанций заменяется новым: гидростанция становится гидравлическим резервом для паровых станций в крупной системе. Гидростанции очень удобны как мгновенный резерв и могут быть использованы не только как резерв мощности, но и как резерв энергии. Поэтому при построении крупных энергетических систем целесообразно проектировать

высоковольтную сеть так, чтобы обеспечить наибольшую возможную маневренную гибкость для гидростанций.

*Распределение нагрузки между параллельно работающими станциями.* В вышеприведенном примере показано использование гидростанций при совместной работе с паровыми, но и распределение нагрузки между паровыми станциями имеет огромное экономическое значение. Как общее правило, с целью уменьшения до минимума стоимости электроэнергию надо те станции, которые дают наибольшую экономию в топливе, использовать в качестве базисных станций. Наиболее устарелые с большим удельным расходом топлива применяются в качестве пиковых; вступающие в эксплуатацию новые станции нагружаются в максимальной степени и несут основную нагрузку; в будущем, по мере устарения и износа оборудования, станции переходят сначала в полупиковые, а потом и в пиковые. С народнохозяйственной точки зрения необходимо в качестве базисных станций использовать те, которые работают на местном топливе, хотя бы это распределение иногда и отличалось от варианта, при котором получается наиболее низкая средневзвешанная стоимость энергии.

*Резерв.* В каждом объединении Э. с. должен быть резерв на случай аварии в каком-нибудь агрегате или в линии электропередачи от отдаленной станции. Различают *резерв станционный* и *резерв сетевой*. Станционный резерв может быть использован только в случае аварии или ремонта на самой станции. К нему относятся резервные котлы (обычно их два: один в чистке, другой — в резерве на случай аварии) и турбогенераторы, не имеющие рабочих котлов. Сетевым резервом может быть только комплект турбогенератора и котлов, могущий быть пущенным в работу взамен вышедшего из строя на какой-либо другой станции объединения. Резервные комплекты рационально держать на станциях ближайших к центру нагрузки. Иногда их размещают на станциях ближайших к тем потребителям, непрерывность электроснабжения которых особенно

важно обеспечить. С точки зрения экономии на транспорт топлива желательно резервные агрегаты держать на станциях, работающих на привозном топливе. С точки зрения уменьшения до минимума стоимости энергии желательно держать резервные агрегаты на станциях наиболее устарелых и вырабатывающих наиболее дорогую энергию. Резерв может быть *холодный*, *горячий* и *вращающийся*. В первом случае резервный комплект (может быть в отдельных случаях целая станция в большом объединении) требует для своего пуска в ход несколько часов и поэтому не может дать скорую помощь в случае аварии. Во втором случае котлы держатся под парами, турбины подогретыми, и резерв может быть введен в работу вскоре после встретившейся в нем надобности; содержание его, однако, значительно дороже содержания холодного резерва. Вращающийся резерв на изолированной станции применяется в тех случаях, когда требуется исключительная гарантия в непрерывности электроснабжения, так как позволяет заменить выбывший элемент мгновенно и автоматически. На станции при таком резерве машины работают не полностью нагруженными, при чем недогрузка вращающихся машин в сумме равна не менее полной мощности одного агрегата. Если выйдет из строя одна машина, то другие автоматически принимают на себя нагрузку и догружаются до нормы. В большой системе (объединение электростанций) целесообразно иметь часть резерва в действующих агрегатах, в виде внутреннего резерва недогруженных турбин, тем более, что коэффициент полезного действия турбин обычно наивысший при  $\frac{3}{4}$  нагрузки. Так, образом всегда имеется вращающийся резерв при работе оборудования на экономическом режиме. В случае вращающегося резерва не исключается наличие холодного резерва для компенсирования снижения мощности гидростанции в течение маловодного периода или на случаи вывода машин в ремонт и ревизию (ремонтный резерв). В объединениях, имеющих значительную разницу между потребностью зимой и летом, след-

ствие наличия большой световой нагрузки, ставят худшие станции в летнее время в холодный резерв, который пускается в ход только в случаях, когда нужно ремонтировать крупные агрегаты.

Кроме резерва в котлах и машинах, необходимо иметь резерв в трансформаторах на понизительных и повысительных подстанциях, а также в линиях электропередач (см. ниже). При трехфазном токе на подстанциях большой мощности применяются, обычно, три рабочих однофазных трансформатора и 4-й резервный на случай порчи одного из 3-х основных. На линиях электропередач трехфазного тока применяется иногда четвертый провод в качестве резервного для трех основных.

Величиной резерва считается разность между суммарной мощностью, установленной на всех станциях объединения, и величиной максимальной часовой потребной мощности хотя бы в течение одних суток в году (максимум нагрузки). Обычно момент максимальной нагрузки наступает зимой в период наибольшей световой нагрузки, но там, где имеется большая сезонная нагрузка (напр. потребность в мощности для орошения или для торфодобычи), максимум нагрузки может быть и в другое время года. Если в период максимума нагрузки некоторые станции по какой-либо причине не могут фактически использовать установленную мощность (напр. вследствие маловодного периода у гидростанции, или несоответствия вследствие крупного ремонта между мощностью котлов и машин, или снижения электрической мощности некоторых теплофикационных турбин при большом отборе пара), то для вычислений величины фактического резерва надо учитывать не установленную, а фактически располагаемую мощность. Величина необходимого резерва зависит от мощности агрегатов и должна быть отнюдь не менее мощности наибольшего агрегата. При непрерывной производственной неделе, когда не имеется праздничных провалов нагрузки, позволяющих производить небольшие ремонты, резерв должен быть не меньше мощности двух наиболь-

ных агрегатов для обеспечения бесперебойности электроснабжения. В объединениях величина резерва составляет 10—20% от максимальной нагрузки. Чем крупнее система, тем меньше % резерва. У изолированных э. с. резерв составляет 30—100% установленной мощности.

*Пределная мощность отдельных агрегатов* на станции определяется величиной допустимого по экономическим соображениям резерва. Автор настоящей статьи определяет наиболее выгодную величину мощности отдельного агрегата в системе, состоящей из однотипных агрегатов, по формуле

$$N = \sqrt{\frac{C \cdot P_m}{Z_0}}$$

где  $N$ —мощность равновеликих агрегатов в системе в квт,  $P_m$ —совмещенный максимум системы в квт,  $Z_0$ —число резервных агрегатов, необходимое по условиям эксплуатации для бесперебойности электроснабжения,  $C$ —так назыв. «характеристика типа»—коэффициент пропорциональности, зависящий от типа агрегатов. Он имеет размерность мощности и получается из эмпирической зависимости величины капитальных затрат  $K$  от производственной мощности агрегата  $K = aN + b$ , где  $a$  и  $b$  числа постоянные в некоторых пределах изменения величины  $N$  для данного типа. Величина  $C = b/a$ . Из формулы, относящейся к теоретическому случаю системы, состоящей из однотипных стандартных агрегатов (с осуществлением идеи блочности котел-турбина), вытекает, что при росте системы наиболее выгодная мощность агрегата растет пропорционально корню квадратному из совмещенного максимума системы. Указанный оптимум определен, исходя из условия минимума капитальных затрат. Исследование автора показало, что оптимум по себестоимости электроэнергетики несколько выше, чем вышеуказанный, и тем выше, чем дороже топливо. Учет стоимости энергии приводит к тому же виду формулы, но величина  $C$  больше, чем в случае определения оптимума только по величине капитальных затрат. Из формулы автор вывел теорию стандартных

мощностей, по которой при стандартизации наиболее выгодная шкала стандартн. мощностей содержит величины кратные коэффициенту  $C$ . На практике наилучшая шкала составляется из цифр ряда:  $C, 2C, 4C, 8C$  (в СССР принята для крупных агрегатов шкала мощностей 12, 25, 50, 100 тыс. квт). Физическое значение  $C$ —наименьшая величина мощности в стандартной шкале для данного типа. По той же теории, каждой стандартной мощности агрегата соответствует определенная величина  $P_{\text{навыг.}}$  совмещенного максимума нагрузки, при которой применение равновеликих агрегатов данной мощности приводит к величине капитальных затрат меньшей, чем при применении любой другой комбинации агрегатов того же типа.  $P_{\text{навыг.}} = Z_0 \cdot N^2 \cdot C$ . В растущей системе начинать устанавливать агрегаты мощности  $2N$  надо не позже, чем по достижении совмещенного максимума величины, равной половине  $P_{\text{навыг.}}$  для агрегата мощности  $2N$  (подробнее см. статью автора: «Теоретические основы стандартизации оборудования электроснабжающих систем», Известия Энергетического института Академии Наук СССР, 1933, вып. 1). Для изолированной станции наиболее выгодная мощность агрегата не должна превышать половины максимальной нагрузки, в большом объединении 8—10%. У нас в СССР при освоении новых районов нужно предвидеть такой быстрый рост нагрузки, при котором сегодня установленный агрегат уже через 2—3 года может оказаться слишком малым (напр. первая очередь Штеровской районной станции имела 2 агрегата по 10 т. квт, вторая очередь—2 агрегата по 22 т. и 3-я—2 по 44 т., при чем это развитие происходило в течение 5 лет). Поэтому у нас в ближайшие годы на наших станциях предполагается установка агрегатов по 50 и 100 т. квт и допускается постройка станций, имеющих только 2 крупные турбины, из которых одна резервная, при чем предполагается, что через короткий срок будет построена следующая очередь этой станции из таких же генераторов или данная станция будет включена в объединение

других станций и чрезмерный для первого года резерв быстро снизится.

В больших объединениях на Западе становится актуальной задача *выбора наиболее дешевого способа покрытия пика нагрузки*. Вследствие большой световой рекламы и малой сменности предприятий, в крупных городах Запада пик более острый, чем в городах СССР. Так, напр., в Берлине 50% максимальной мощности имеет в течение года только 1.100 часов использования, в Москве—4.300. На рис. 7 показано

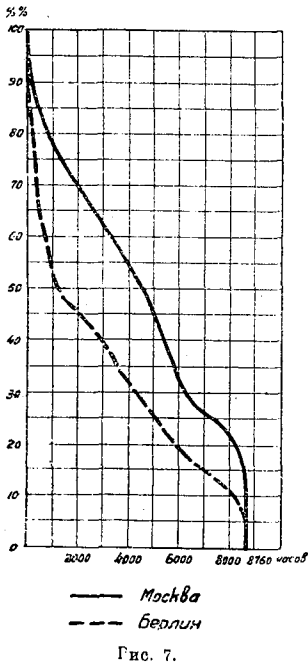


Рис. 7.

сравнение графиков продолжительности использования мощности для московского и берлинского объединения Э. с. (иногда называемые кривыми Россандра). Станции, покрывающие пики нагрузки, работают очень неэкономно, так как число часов использования их за год очень мало. В 20-х годах XX-го века начали применяться на Западе специальные способы покрытия пика, напр. при помощи очень мощной дизельной станции (в Гамбурге с дизелями по 15.000 лощ. сил каждая) или при помощи мощных аккумуляторов. Электрические аккумуляторы для последней цели применяются редко и

то только при малых мощностях; значительное применение получили паровые аккумуляторы типа Рутса. В 1929 г. в Берлине построена пиковая станция, снабженная аккумуляторами Рутса на мощность 40.000 квт. В часы провала графиков котельная станции работает на зарядку аккумуляторов, а в часы пиковой нагрузки аккумуляторы возвращают накопленную тепловую энергию. За самые последние годы в ряде стран стали применяться мощные гидравлические аккумуляторы, из них крупнейшей является установка Хердеке в Германии на мощность около 200 т. лощ. сил. Принцип гидравлического аккумулятора заключается в том, что в местности, обладающей необходимыми природными данными, образуются искусственное водохранилище на некоторой высоте над рекой или озером. Из водохранилища вода подводится по трубам к гидростанции, снабженной, кроме гидравлической турбины и генератора, еще водяным насосом, который обычно расположен на одном валу с генераторами турбины. Паровая станция, работающая совместно с таким гидроаккумулятором, имеет ровную нагрузку в течение суток. При уменьшении потребности сети ниже средней величины, энергия посылается на гидростанцию, где генератор, работая как синхронный электродвигатель, приводит в движение насос, накачивающий воду из реки или озера в верхнее водохранилище. Когда потребная мощность для сети становится выше средней, начинает работать гидростанция, расходуя воду, накопленную в водохранилище. Мощность турбины обычно выше мощности насоса, так как последний работает более длительный срок. В германских условиях гидроаккумулятор стоит около 300 марок на установленный киловатт. В Англии предполагается установить несколько гидроаккумуляторов для работы на государственную сеть „решетку“ (см. *электрификация*). Общим недостатком всех аккумулирующих устройств являются большие потери при двукратной трансформации энергии из одного вида в другой, вследствие чего коэффициент полезного действия имеет величину порядка не выше 60—70% (иногда и меньше). В условиях

социалистического хозяйства имеются другие способы рационального распределения нагрузки между совместно работающими станциями, не сопряженные с большими потерями энергии, а именно: регулирование потребления, в частности работа некоторых энергоемких потребителей по заранее заданному графику нагрузки (см. статью автора в т. XI Генплана электрификации, 1932—1933).

В 1929 г. на конференции в Токио Робинсон сообщил, что в САСШ полагают, что наилучшее разрешение задач покрытия пиковой мощности будет достигнуто путем увеличения допустимой перегрузки оборудования Э. с. до 100% для кратковременной работы. Эти требования, по мнению Робинсона, должны быть предъявлены электроснабжающей промышленностью машиностроительным заводам.

В условиях СССР, как уже отмечалось выше, проблема покрытия пик нагрузки стоит не так остро, как в капиталистических странах, и у нас вряд ли целесообразно иметь оборудование, специально предназначенное для покрытия пик.

Л и т е р а т у р а: проф. *Клингенберг*, „Сооружение крупных электростанций“ (Ленинград, 1927, перев. под ред. В. В. Дмитриева, и Москва, перев. под ред. проф. Угрюмова); проф. *В. В. Дмитриев*, „Электрические силовые установки“ (1929); *Э. Мероуиш*, „Эксплуатация центральных электрических станций“ (1928); доктор инж. *Фр. Мюнцингер*, „Котельные установки больших силовых станций“ (1929, пер. с немец.); *Н. И. Сушкин* и *А. А. Глазунов*, „Центральные электрические станции и их электрооборудование“ (1927); инж. *К. П. Лован* и инж. *Б. А. Барсуков*, „Современные американские электрические станции“ (1927); „Четыре горные станции“ (1930); описание электр. станций „Красный Октябрь“, Нижегородской, Брянской и Осиновской); *Шрейбер*, „Районная электрическая станция на низкосортном угле“ (пер. с нем., 1929); инженер-электрик *Г. Г. Горбунов*, „Графики электрической нагрузки“ (1927); *Т. Крофт*, „Электрические станции и подстанции“ (пер. с английск.); „Труды мирового инженерного конгресса и мировой энергетической конференции в Токио в 1929 г.“ (на англ. языке; обзор этих трудов см. „Плановое хозяйство“, № 3, 1930, статья Кукель-Краевского); „Труды второй мировой энергетической конференции в Берлине в 1930 г.“ (изд. на немецк., англ. и французск. яз. в 2х томах; обзор этих трудов см. статьи проф. В. И. Вейн в журн. „Электричество“, 1931, №№ 11—16); *Глазунов А. А.*, „Технические заметки о районных электрических станциях в С.-А. С. Ш.“ (1931); *Лаговский, А. А.*, „Теплосиловые установки центральных электрических станций“ (1931); *Понроков, М. Ф.*, „Электрические станции городские и фабрично-заводские“ (1931); *Рябов, А. Я.*, „Электрические распределительные устройства крупных станций и подстанций“ (1932); *Эпштейн, Г. Л.*, „Районные трансформаторные подстанции“ (1932); *Рыжский, В. Я.*, „Новейшие американские электр. станции“ (1932); *Дарманцев, А. К.*, „Графики электрической нагрузки“ (1933); *Дид, Ф. А.*

„Ходрасчет в энергоснабжении“ (1932); „Генеральный план электрификации СССР“, том VII (Госплан СССР, 1932); *Кукель-Краевский, С. А.*, „Плановый ремонт агрегатов электроснабжающей системы“ (1932); *Азапов, Бабилов* и др., под ред. проф. *Н. И. Сушкина*, „Принципы проектирования типовых электростанций“ (1933); „Электрэнергетика СССР“ (коллективное исслед. Изв. Акад. Наук СССР, 1934).

*С. Кукель-Краевский.*

VI. *Теплоэлектроцентрали.* На любой электростанции, превращающей химическую энергию любого топлива в электрическую, значительная часть энергии сожженного топлива остается в форме тепла, которое теряется главным образом в охлаждающей механизмы воде. Этим обуславливается низкий коэффициент полезн. действия использования энергии топлива. Однако, тепловая энергия, не превращенная в электрическую, может быть использована для практических целей как таковая, напр. для ряда технологических процессов в промышленности, для бытовых нужд и для отопления. Любая электростанция, отпускающая потребителям не только электроэнергию, но и тепло, полученное от сжигания топлива при производстве электроэнергии, называется *теплоэлектроцентралью* (ТЭЦ). Такая станция одновременно выполняет две функции: централизованного теплоснабжения и комбинированного производства из топлива двух видов энергии—электрической и тепловой—для практического применения.

ТЭЦ может иметь любые первичные двигатели: паровые машины, дизеля, газовые двигатели и паровые турбины, но широкое применение за последние годы получили только ТЭЦ с турбогенераторами; поэтому в дальнейшем описываются свойства именно этих ТЭЦ.

Централизованное теплоснабжение в городах и на предприятиях от мощной центральной котельной может быть осуществлено и без выработки электроэнергии (см. XLV, ч. 3, прил. *Центральное и местное отопление, 358*). В этом случае основной теплоноситель, пар, получается при давлении и температуре, близких к необходимым для потребителя. Если в центральной котельной получается пар более высокого давления, чем нужно для централизованного теплоснабжения, то, пропустив этот пар через турбину или паровую машину, можно получить за счет отдачи им ме-

ханической энергии при расширении до требуемого конечного давления некоторое количество электроэнергии с

экономичность ТЭЦ как источника электроэнергии \*).

Централизация теплоснабжения да-

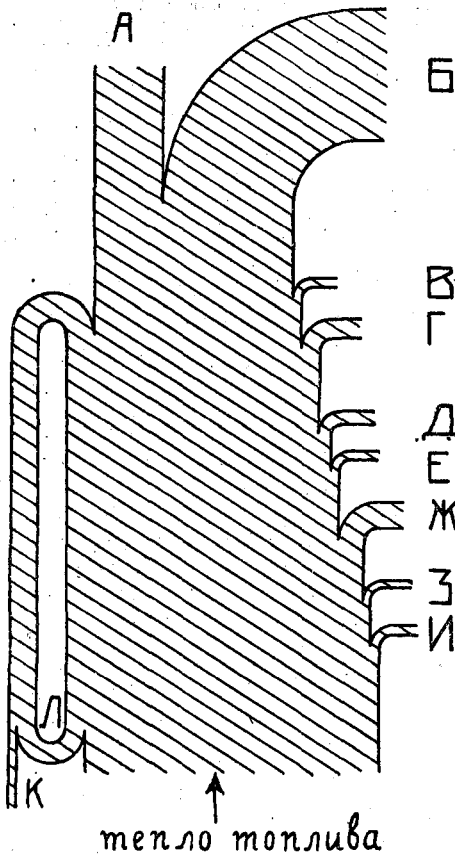


Рис. 1.

Рис. 1. Примерная тепловая диаграмма современного конденсационного агрегата котел-турбогенератор (начальное давление порядка 30 атм.): А—полученная электроэнергия (20—28%); Б—потери с конденсационной водой (порядка 5%); В—прочие потери (3—4%); Г—потери механические, электрические и лучеиспускаем в машинном отделении (6—7%); Д—прочие потери в котельной (1—5%); Е—потери в трубопроводах (2—3%); Ж—потери отходящими газами (8—10%); З—потери в топке, котле, пароперегревателе и экономайзере (3—4%); И—потери от несоревшего угля (4—5%); Л—возврат тепла с конденсатом (собственное тепло конденсата и от регенерации); К—потери в связи с возвратом конденсата (1—2% входят в В).

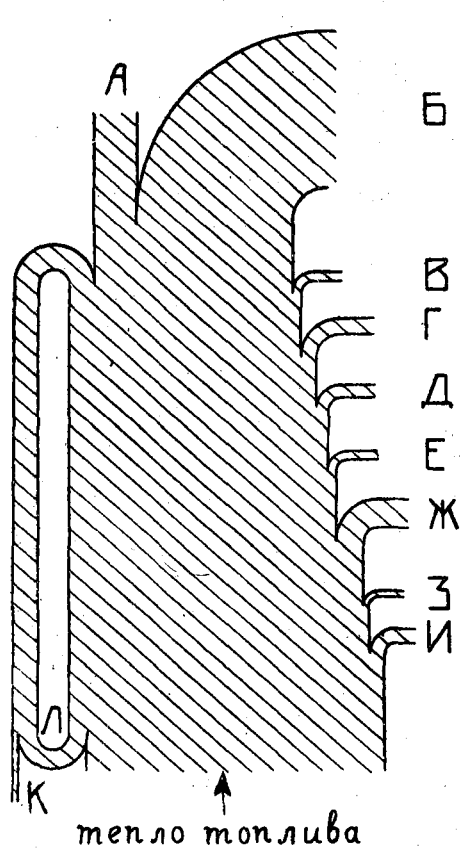


Рис. 2.

И—потери от несоревшего угля (4—5%); Л—возврат тепла с конденсатом (собственное тепло конденсата и от регенерации); К—потери в связи с возвратом конденсата (1—2% входят в В).

Рис. 2. Примерная тепловая диаграмма теплофикационного агрегата (с-з конденсационной части; начальное давление порядка 30 атм., отъемный пар порядка 1,2 атм.). А—полученная электроэнергия (10—11%); Б—отдача пара давлением порядка 1,2 атм. (порядка 60%); остальные потери—те-же, что и на рис. 1.

сравнительно небольшим расходом топлива, *добавочным* к тому расходу, который необходим для централизованного теплоснабжения от центральной котельной низкого давления, а именно около 0,2 кг на квт/ч. (мало зависит от начального и конечного параметра), т.е. раза в 3 меньше, чем на конденсационной станции. На этом базируется

\* На рис. 1 и 2 приведен сравнительный баланс тепла конденсационного агрегата котел-турбогенератор и теплофикационного (при отсутствии у последнего конденсационной части). Из этого сравнения наглядно видно, что из тепла, заключенного в сожженном топливе, в первом случае получается 20—28% электроэнергии и непроизводительно теряется с конденсационной водой 5%, а во втором случае хотя и получается меньше электроэнергии (10—11%), но зато вовсе отсутствуют потери тепла в конденсаторе, и около 60% тепла, заключенного в топливе, используется производительно на теплоснабжение.

ет следующие экономические и народнохозяйственные выгоды: 1) позволяет заменить малоэкономичные многочисленные индивидуальные котлы и печи одной мощной и высокоэкономичной котельной; 2) очень значительно уменьшает потребность в персонале для теплоснабжения; 3) допускает перевод теплоснабжения на любой вид топлива, в частности — низкокалорийное местное топливо; 4) снижает затраты на транспорт топлива по городу к индивидуальным котельным. Но для использования этих преимуществ требуются значительные затраты на тепловые сети, которые экономически оправдываются лишь при достаточно большой *плотности* теплового потребления. Социалистическое строительство промышленности и населенных мест создает предпосылки к увеличению *плотности* потребления тепла и вместе с тем к повышению экономичности централизованного теплоснабжения.

Комбинирование теплоснабжения с электроснабжением (теплофикация) дает дальнейшие преимущества по сравнению с простой централизацией теплоснабжения: с относительно небольшими добавочными капитальными затратами и добавочным расходом топлива получается электроэнергия на тепловом потреблении, которое в большинстве случаев дешевле даже гидроэнергии (за исключением случаев, когда гидроцентральный может быть сооружена очень дешево и имеет исключительно высокий коэффициент использования, что в европейской части СССР не имеет места). Поэтому согласно указаниям партии (июльский пленум ЦК ВКП (б) 1931 г.) и правительства сооружение мощных ТЭЦ во всех центрах сосредоточенного потребления тепла признается одним из основных принципов электрификации СССР. Уже во второй пятилетке СССР в области теплофикации выдвинулся на первое место в мире. Возможности практического осуществления этой идеи в наших условиях особенно велики, поскольку мы планируем одновременно и развитие потребностей энергии, и их размещение, и развитие системы энергоснабжения.

В виду незначительной *дальности* передачи тепла от центра его выра-

ботки (если теплоноситель пар — дальность порядка нескольких км, если теплоноситель вода — максимальная дальность порядка 10 км) ТЭЦ в отличие от других электростанций обязательно располагается в непосредственной близости к центрам сосредоточенного потребления тепла и, будучи включена в большую электроэнергетическую систему, должна иметь свой собственный резерв для теплового потребления, тогда как электрический резерв может быть общим для целой системы и размещен теоретически в любом месте. Отсюда вытекает значительное усложнение проектирования электроэнергетических систем, включающих ТЭЦ. В СССР в недалеком будущем разделение паровых турбинных электростанций на теплофикационные и конденсационные практически исчезнет, и каждая паровая электростанция в большей или меньшей степени будет одновременно выполнять задачи и электроснабжения, и теплоснабжения (хотя бы от одного или двух агрегатов).

Величина электроэнергии, получаемой с наибольшим расходом топлива от каждой единицы отдаваемого тепла, тем больше, чем больше величина разности теплосодержания пара, полученного от котла и отданного для теплоснабжения, а, следовательно, зависит в сильнейшей степени от начальных и конечных параметров пара (т. е. давления и температуры). В табл. 1 для примера показано число квт/ч. получаемое от одной отданной в тепловую сеть мегакалории (один млн. больших калорий) тепла, а в табл. 2 — число килограммов пара, пропущенного через турбину для получения одного квт/ч. электроэнергии по тепловому потреблению.

Повышение начального давления и температуры пара и понижение давления пара, необходимого потребителям, увеличивает количество электроэнергии, получаемой по тепловому потреблению. Отсюда стремление понижать по возможности давление пара на технологические процессы и заменять пар горячей водой. Для отопления в СССР отпускается горячая вода, приготовленная из пара низкого давления в „бойлерах“ на ТЭЦ.

Таблица 1

Число квтч (мгвтч) электрической энергии, получаемое от теплового потребления в тысячу больших калорий (одну мегакалорию).

(„Тепло и Сила“, 1988, № 7, стр. 10)

Начальные параметры пара	Конечное давление пара	Число квтч или мегаваттчасов
25 ата 350°C	1,2 ата	0,186
	8,0	0,076
50 ата 450°C	1,2	0,218
	8,0	0,132
100 ата 400°C	1,2	0,275
	8,0	0,165
100 ата 50°C	1,2	0,292
	8,0	0,178

Таблица 2

Расход пара в кг на квтч.

Начальные параметры пара	Давление отбора пара	
	1,2 ата	8 ата
20 ата 350°C . . . .	9,1	15,8
30 ата 400°C . . . .	7,7	12,1
60 ата 450°C (без промежуточного перегрева) . . . .	6,3	8,8
100 ата 450°C (с промежуточным перегревом) . .	5,2	6,9

На ТЭЦ к описанным в ст. *электрические станции* (см. ЛП, 500) нормальным круговым процессам обычной электростанции прибавляется круговой процесс отпущенного для теплоснабжения пара, который может выйти за пределы станции к потребителю (если последний получает первичный пар) или замкнуться на станции (если потребители получают вторичный пар от „паропреобразователей“). Последнее влечет за собой непроизводительную потерю давления в несколько атмосфер, неиспользуемого для выработки электроэнергии. Это необходимо, если потребитель не может по условиям технологического процесса вернуть теплоноситель („не возвращает конденсат“) либо возвращает его в сильно загрязненном виде. В отдельных случаях потеря конденсата может доходить до 80 и более %/о, и для питания котлов приходится пользоваться свежей водой, подвергнув ее в установках высокого

давления химической очистке, или используя для этой цели испарители. Вообще вопрос о водоочистке на ТЭЦ значительно сложнее, чем на конденсационной электроцентрали. Если конденсат возвращается, то часть тепла, переданного потребителям, возвращается в котел, так как обратная вода имеет всегда более высокую температуру, чем свежая питательная вода для котлов.

*Типы теплофикационных турбин*, применяемых в мировой практике и на ТЭЦ СССР до 1984 г., очень разнообразны. Это зависит от особенностей графиков тепловой нагрузки, отличающихся от графиков электрической нагрузки, а также от необходимости отпущать потребителям пар не одного, а по крайней мере двух параметров („повышенного потенциала“ преимущественно для промышленности и „пониженного“ преимущественно для отопления). График потребления промышленного тепла в течение суток и года похож на график потребления электроэнергии той же промышленности, мало меняется по сезонам и резко меняется в течение суток. В некоторых пределах его форму можно регулировать при помощи *паровых аккумуляторов*.

Соотношение между электрической энергией, получаемой по тепловому потреблению промпредприятия, и его потреблением электроэнергии может быть очень различно. График отопительной нагрузки резко меняется по сезонам и сравнительно мало в течение дня (суточный график можно тоже регулировать), но в различные дни одного и того же месяца может изменяться по величине в очень широких пределах, т. е. зависит от метеорологических условий. Наиболее низкая температура, при которой надо обеспечить отопление от ТЭЦ, встречается в течение очень короткого числа часов в году, а потому после понижения ниже некоторого предела ТЭЦ обычно отпущает добавочное тепло уже не от пара, пропущенного через турбины, а от пара, полученного дросселированием из котлов за счет форсировки последних (вполне установившегося решения этого вопроса об отоплении в наиболее холодные дни, т. е. покрытия отопительных пик, еще не имеется).



Если бы ТЭЦ всегда вырабатывала только ту электроэнергию, которая получается по тепловому графику, ее выработка менялась бы совершенно независимо от фактической потребности в электроэнергии, что неминуемо влекло бы за собой необходимость иметь отдельный „конденсационный резерв“, т.е. дублировать мощность, за исключением только редких случаев совместной работы ТЭЦ и гидроцентральной, имеющих неограниченные возможности регулирования мощности в течение суток и нескольких дней, а также минимум выработки энергии во время отопительного сезона. Изолированная ТЭЦ, имеющая задачей одновременно покрывать и тепловые графики, и электрический, обязательно должна иметь турбины, могущие вырабатывать электроэнергию независимо от теплового потребления, т.е. конденсационные с отбором пара. Только ту часть теплового графика, которая соответствует технологическому потреблению, принципиально возможно покрывать и в этом случае турбинами без конденсационных частей (турбины с противодавлением).

Если ТЭЦ расположена в местности, удобной по условиям топливоснабжения (место добычи топлива) и водоснабжения, она и в случае изолированной работы и в случае включения в систему должна иметь кроме чисто теплофикационной части и конденсационную (так наз. „конденсационный хвост“) в любом размере. Для ТЭЦ в системе, расположенной неблагоприятно по топливоснабжению и водоснабжению, конденсационная часть должна быть ограничена самым необходимым по условиям ее работы в системе минимумом. Конденсационную часть вообще выгоднее иметь не в виде отдельных конденсационных турбин, а в виде конденсационной части теплофикационных турбин, что требует примерно вдвое меньших капитальных затрат. Только в тех случаях, когда потребность в конденсационной мощности на ТЭЦ превышает некоторый предел, на ней будут устанавливаться и чисто конденсационные турбогенераторы.

Принцип агрегатности котел-турбина можно осуществить с теплофика-

ционными устройствами без чрезмерного увеличения мощности котельной только при некоторых типах турбин, и во всяком случае требуется паровая магистраль, связывающая котлы соседних агрегатов и позволяющая использовать в одном агрегате свободную мощность котлов другого агрегата, когда это нужно. В обычных условиях каждый котел даже при наличии такой связи будет работать на свою турбину.

Вопрос об оптимальном типе турбин для ТЭЦ, включаемых в сложную электроэнергетическую систему, в 1933 г. еще находился в стадии оживленной дискуссии. Отсутствие и мирового, и нашего опыта и только начавшаяся теоретическая разработка этого вопроса не позволили еще дать однообразного решения. Автор настоящей статьи предложил облегчить осуществление стандартизации теплофикационных турбин при отсутствии пригодного для всех разнообразных случаев однозначного решения о типах турбин следующим путем: разработать серии турбин различных типов, состоящих из одних и тех же стандартных частей с тем, чтобы иметь однообразие конструкций и запасных частей при разнообразии типов. До 1934 г. эта проблема была разработана в виде проекта серии типов только для одного случая коммунальных ТЭЦ (проф. Г. С. Жирицкий — МЭИ).

Основными типами теплофикационных турбин являются: а) турбина конденсационная с одним регулируемым отбором пара ( $KO$ ) или с двумя регулируемыми отборами пара двух различных давлений ( $KOO$ , или  $K2O$ ). Эта турбина в зависимости от соотношения между расчетными расходами пара в различные части ее и в зависимости от величины конденсатора может иметь электрическую мощность, снижающуюся при увеличении отбора пара после некоторого предела или одинаковую при всех величинах отбора от нуля до максимума (временный стандарт Главэнерго в 1933 г.), что, однако, достигается искусственно некоторым превышением мощности турбины по сравнению с мощностью электрического генератора или ограниче-



24 мгвт предвключенных) с котлами Лефлера на 130 атм. и с прямоточным котлом на 140 атм. оригинальной советской конструкции. В том же году находился в постройке ряд крупных ТЭЦ в СССР. Первая ТЭЦ общего пользования в СССР в Ленинграде (3-я городская) работает с 1927 года.

Доля участия ТЭЦ в электроснабжении СССР во второй пятилетке быстро растет из года в год. В 1934 г. начинается постройка первая ТЭЦ на 120 атм. на советском оборудовании (Московско-Нарвская ТЭЦ в Ленинграде). ТЭЦ получили некоторое распространение в Германии, например Мангеймская на 100 атм., Ильза-Рената на 120 атм. и ряд фабрично-заводских или городских на меньшее давление пара. В С.-А.С.Ш. централизованное теплоснабжение применяется уже с самого начала XX-го столетия, но преимущественно от простых центральных котельных без комбинирования с электроснабжением. Однако, за последние годы и там стали применяться ТЭЦ на крупных предприятиях и появляются отдельные случаи установок теплофикационных турбин на крупных электростанциях общего пользования. Однако, *районные* ТЭЦ в полном смысле слова пока создаются только в СССР. На 1-е октября 1932 г. находилось в эксплуатации в СССР ТЭЦ: фабрично-заводские на 287 мгвт., районные — 182 мгвт., городские — 39 мгвт. всего 508 мгвт. и теплосетей в городах суммарной протяженностью 130 км.

Так как на ТЭЦ вырабатывается одновременно 2 вида продукции, распределение капитальных затрат и стоимости энергии между этими видами может быть сделано только условно. При заданной величине потребления электрической энергии и тепла в каком-либо центре, сумма капитальных затрат, а также сумма ежегодных расходов на электроснабжение, как правило, меньше при удовлетворении всей потребности от ТЭЦ, чем при изолированном покрытии потребности в электроэнергии от конденсационной станции и в тепле от центральной котельной. Исключение из этого правила может иметь место при малой плотно-

сти потребления тепла. при малом раз- мере ТЭЦ и наличии очень дешевой энергии от крупнейшей районной конденсационной станции, расположенной у места топлива.

На ТЭЦ величина капитальных затрат и величина годовых эксплуатационных расходов, отнесенные на единицу мощности, снижаются быстрее в зависимости от укрупнения станции, чем у конденсационных центральных. Отнесение этих величин на единицу *электрической* мощности может привести к ошибочным выводам при сравнении с конденсационными центральными, т. к. эти показатели для ТЭЦ имеют иное значение, чем для конденсационных.

Вопрос о рациональной системе показателей для ТЭЦ еще подвергался дискуссии в 1933 г., о чем см., напр., указанную ниже брошюру А. Н. Румянцевца и журнальные статьи: А. И. Шефтель, „Тепло и Сила“, № 3. Б. М. Якуб, „Тепло и Сила“, № 7, 1933. С. А. Кужель-Кравевский, „Электричество“, № 2, (1934).

Кроме описанного выше основного современного типа ТЭЦ, возможен особый тип, имеющий, несомненно, будущее: конденсационная станция, использующая низкопотенциальное тепло охлаждающей воды конденсаторов для соответствующих тепловых потребителей, напр. для нагрева почвы с сельскохозяйственной целью. Можно предвидеть расширение такого применения отбросного тепла (тепло, полученное из пара, отобранного от турбины, по существу не является отбросом), если будет осуществлена практически идея теплового трансформатора, разработанная теоретически немецким инж. Кенеман, или идея французского инж. Клода об использовании небольших температурных перепадов.

Литература: „Типизация паровых турбин и тепловые схемы больших электростанций“ (ч. II, под ред. А. Г. Горянова, 1933); проф. В. В. Дмитриев, „Электрические силовые установки“, 1929; Принципы проектирования типовых электростанций“ (коллектив авторов под редакцией Н. И. Суикана, 1933); инж. Б. Л. Шифринсон, „Теплофикация городов“ (1929); А. Н. Румянцев, „Технические показатели калькуляций продукции ТЭЦ“ (1933); Б. М. Якуб, „Теплоэлектроцентрали“ (1933); Л. Л. Гинтер, „Теплофикация центрального района г. Москвы“; „Труды конференций теплофикации“—Всесоюзной (1931), I-й Ленинградской (1933); „Труды мировых энергетических конференций“; „Kraft und Wärmewirtschaft in der Industrie“, Preußinger-Gerbel (1927); рус. перевод, 1929; „Abwärmetechnik“, 3 Bänder, Hans



ления спецификации; в) трехлинейные с показанием полного соединения всех элементов установки как на стороне высокого, так и низкого напряжения, как переменного, так и постоянного тока; и г) монтажные.

Каждая установка должна обладать принципиальной схемой, обеспечивающей наиболее целесообразную связь основных ее элементов, облегчающей эксплуатационные переключения и дающей надежность коммутационных манипуляций при авариях. В то же самое время остановка, построенная по этой принципиальной схеме, должна быть технически совершенной и рентабельной в нормальной эксплуатации.

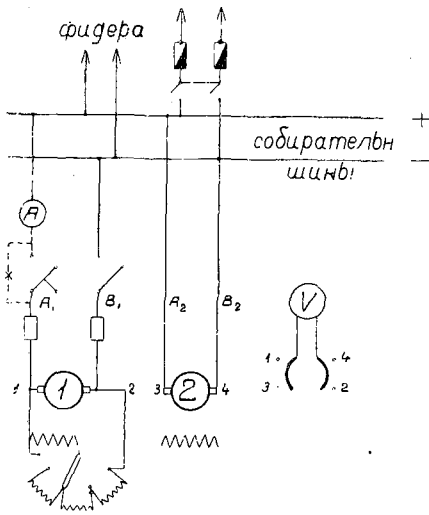


Рис. 2.

В дальнейшем мы рассмотрим гл. обр. принципиальные схемы, как уясняющие картину путей протекания энергии, и отчасти остановимся на однолинейных схемах, необходимых для выбора аппаратуры на станциях.

Схемы станций, вся энергия которых коммутируется на генераторном напряжении, применяются для городских и фабрично-заводских станций и отчасти теплоэлектроцентралей. При постоянном токе и применении шунтовых генераторов схема станций будет чрезвычайно проста (рис. 2). Для включения на параллельную работу предусмотрена на минимальном

выключателе  $A_1$  лампа, по погасанию которой при замкнутом рубильнике  $B_1$  и равенстве напряжений между точками 1-2 и 3-4 можно судить о совпадении полярностей двух машин, т.е. о возможности выключения. Минимальный автоматический выключатель тока поставлен для защиты генератора от перехода его на работу двигателем. Вместо простого рубильника  $B_1$  можно было бы поставить максимальный автомат, регулируя его на допустимый ток перегрузки. В этом случае предохранители будут защитой от короткого замыкания и действуют при неисправности максимального автомата. Перевод нагрузки от одного генератора на другой производится изменением их возбуждения, как это известно из рассмотрения параллельной работы машин постоянного тока (см. *электротехника — электрические машины*).

Нагрузка станции в течение суток и в различные времена года не остается постоянной, но меняется в зависимости от характера потребителя и условий отпуска энергии (тариф). Для наилучшего использования машин на станциях постоянного тока обычно употребляют для совместной с ними работы емкостную аккумуляторную батарею, которая отдает энергию в периоды максимальных нагрузок и заряжается свободной мощностью машин в периоды слабой нагрузки станции. Величина аккумуляторной батареи определяется в каждом отдельном случае особо, в зависимости от условий эксплуатации и стоимости ее установки и ухода за ней. Из схем станций постоянного тока с аккумуляторной батареей мы рассмотрим одну, наиболее распространенную. Как известно, аккумуляторная батарея состоит из отдельных элементов, соединенных последовательно, поэтому ее напряжение определяется формулой  $U = e \cdot n$ , где  $e$  — напряжение одного элемента, а  $n$  — их число. На станциях при стационарных установках употребляются почти исключительно свинцовые аккумуляторы (см. I, 587 сл.). Наименьшее напряжение разряда, допускаемое для элемента без опасности повреждения его, равно 1,8 или 1,83 в, максимальное зарядное напряжение будет 2,55, иногда 2,7 в. Напря-

жение при начале разряда равно 2,1 в, устойчиво держится на 2 или 1,9 в и затем медленно спадает. Выгоднее разряжать батарею малым током; например, при разряде в течение 7,5 часов емкость на 30% больше, чем при разряде в 3 часа. Коэффициент полезного действия аккумуляторной батареи по киловаттчасам равен от 0,7 до 0,855, а по амперчасам от 0,88 до 0,92. Минимальный зарядный ток не должен быть ниже соответствующего восьмичасо-

На рис. 3 представлена схема такой вспомогательной батареи с зарядным агрегатом. Включая рубильник *A*, мы присоединяем аккумуляторную батарею к сети, и ток разряда от ее плюса через верхнюю ручку элементного коммутатора, плюсовую шину, сеть, минусовую шину, амперметр (указатель направления тока) и предохранитель попадает в минус батареи. Роль двойного элементного коммутатора (в более простых схемах он может быть

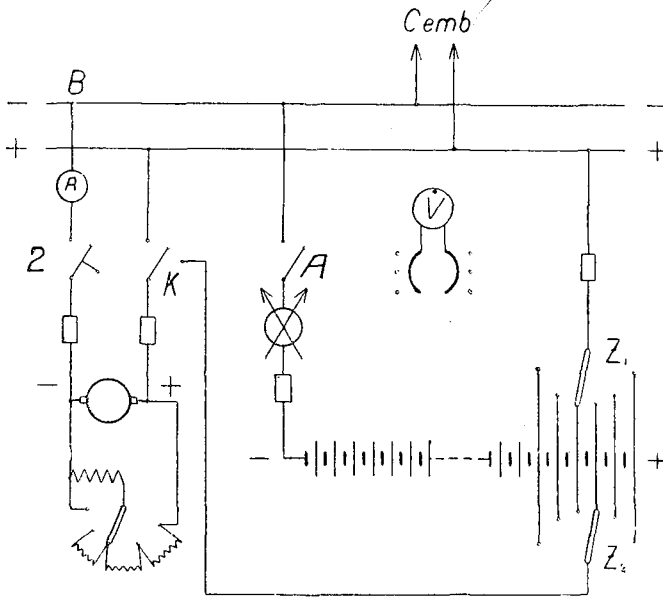


Рис. 3.

вого разрядного и максимальный зарядный—не выше двухчасового разрядного.

Аккумуляторные батареи по назначению распределяются на: емкостные, буферные и вспомогательные. Назначение емкостных батарей отмечено выше; буферные, работая параллельно с генераторами, воспринимают на себя все кратковременные толчки нагрузки, тем разгружая генераторы и уменьшая потребную мощность станции. Вспомогательные употребляют для обслуживания собственных нужд электрических станций переменного тока, снабжая энергией от независимого источника сигнальные, обслуживаемые на расстоянии и иные приспособления.

одинарным) заключается в том, чтобы, с одной стороны, включая большее или меньшее число элементов аккумуляторной батареи, поддерживать постоянное напряжение при разряде, а затем, при одновременной работе генератора на сеть и заряд батареи, обеспечить нормальное протекание последнего, так как к нему подведены ответвления от некоторого числа элементов.

Всякую схему с аккумуляторной батареей необходимо рассматривать с точки зрения выполнения ею следующих основных режимов работы: 1) машина одна работает на сеть, 2) аккумуляторная батарея одна работает на сеть, 3) машина и батарея работают параллельно, 4) машина заряжает батарею, и 5) машина заряжает батарею и одновременно питает сеть. Рассматривая нашу схему, мы видим, что для первого режима необходимо переключатель *K* поставить влево и замкнуть минимальный автомат 2. Второй режим осуществляется включением рубильника *A* при отключенном *K* и 2. Переключатель *K* для третьего режима стоит вправо, а генератор при доведении его напряжения до напряжения батареи помощью минимального автомата 2 присоединяется параллельно

к сети, при чем для этого нужно, чтобы ручка элементного коммутатора ставилась бы всегда на таком элементе, чтобы батарея давала напряжение, равное напряжению шин. Четвертый режим осуществляется так же, как и предыдущий. В этом случае ток протекает от плюс генератора через верхнюю ручку  $Z_1$ , плюс батареи, проходит батарею, заряжая ее, и далее, через указатель направления тока, выключатель  $A$  возвращается через минусовую щетку в генератор, Необходимо помнить, что аккумуляторная батарея не меняет свои полюса—зарядается или разряжается она, меняется только направление тока; поэтому всегда плюс генератора соединен с плюсом батареи, а минус первого с минусом второй. При отключенных внешних фидерах мы напряжение генератора поднимаем до напряжения, необходимого для заряда, т.е. до 2,45 в на каждый элемент батареи. Самым сложным режимом является пятый. В рассматриваемой схеме он осуществляется при постановке переключателя  $K$  вправо. Так как для заряда необходимо повысить напряжение генератора, а для питания внешней сети держать его постоянным, то одновременно удовлетворить этим противоречащим требованиям можно следующим образом. Разрядную ручку  $Z_1$  элементного коммутатора ставим так, чтобы между ней и точкой  $A$  было нормальное напряжение сети, и все время его поддерживаем постоянным, передвигая первую. Замыкая выключатель  $2$  при  $K$ , стоящем вправо, зарядную ручку  $Z_2$  ставим на крайний разряженный элемент и напряжение генератора регулируем таким образом, чтобы через батарею шел нормальный зарядный ток (его величина указывается заводом, поставляющим аккумуляторы). Тогда разница между напряжением генератора и сети будет падать на элементы, заключенные между ручками  $Z_1$  и  $Z_2$  коммутатора. Ток генератора, попадая в ручку  $Z_2$ , проходит эти элементы, разветвляется на том из них, где стоит ручка  $Z_1$ , при чем одна часть его, равная нормальному зарядному току, проходит батарею, другая, равная нагрузке сети, через ручку  $Z_1$  отправляется в сеть.

Оба тока соединяются в точке  $B$  и через выключатель  $2$  замыкаются на минусовую щетку генератора. Такая работа возможна только тогда, когда ток сети, являющийся током перегрузки для элементов между ручками коммутатора, не будет больше 25% зарядного тока.

Способ заряда (режим четвертый и пятый) осуществляется здесь помощью повышения напряжения у зарядного генератора. Недостатком его является необходимость иметь генератор с широкой регулировкой напряжения (от 1,83 и  $V$  до 2,5 и  $V$ , где  $n$ —число элементов батареи), т.е. с большим количеством железа и малым насыщением. Такие машины стоят гораздо дороже, чем обычные. Вторым способом заряда является деление батареи на две или три части, при чем последний более экономичен. Если обозначить части батареи через  $A$ ,  $B$  и  $C$ , то сначала для заряда соединяют последовательно  $A$  с  $B$ , затем  $A$  с  $C$  и наконец,  $B$  с  $C$ . Так как нормальное напряжение при осуществлении режима пятого будет выше, чем потребное для заряда двух частей батареи, то необходимо в зарядную ветвь последовательно включить регулируемое сопротивление, которое поглощает разницу напряжений. Этим вызываются дополнительные потери, и в результате получается меньшая экономичность этого способа по сравнению с первым.

Наиболее совершенным способом заряда при удобстве манипулирования и легкости перехода от работы с одного режима на другой является способ с применением вольтодобавочной машины.

Из схем станций переменного тока мы рассмотрим только наиболее часто употребляемые. Самой простой для низкого напряжения будет схема, изображенная на рис. 4, которая в основном построения не требует. Синхронизирующее приспособление, состоящее из лампы и нулевого вольтметра, включено между генератором и шинами. Тогда при постановке переключателя на контакты  $a$  и  $b$  мы осуществляем соединение между соответственными 2 и II фазами генератора и шин, а между I и I включаем фазовую лампу и страхующий ее работу нулевой вольт-

метр. При затухании лампы и нулевом показании вольтметра можно включать рубильник генератора II. Так как напряжение на шинах получается только при включенном рубильнике генератора I, то синхронная работа с шинами соответствует синхронной работе двух

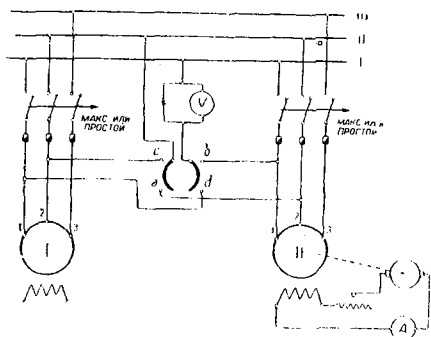


Рис. 4.

генераторов. Прибавляя контакты у вольтметрового переключателя, мы можем осуществить синхронизацию между несколькими машинами. Подобный способ включения генераторов на параллельную работу возможен только после того, как найдено соответствие фаз шин и генератора, т.е. известен порядок чередования фаз.

Для станций высокого напряжения необходимо синхронизирующее приспособление и все измерительные и контрольные приборы включать через особые измерительные трансформаторы тока и напряжения (см. *электротехника — электрические измерения*). Так как, согласно стандарта, наивысшее напряжение генераторов переменного тока, изготовляемых в Союзе, не должно быть больше 10,5 квт, то естественно возникает вопрос о тех предельных значениях мощностей параллельно присоединяемых генераторов, которые ограничиваются, с одной стороны, надежностью устройства сборчательного и распределительного сооружения, а с другой — удобством и бесперебойностью эксплуатации. Многочисленные подсчеты и практика применения высоковольтной аппаратуры показали, что сосредоточивание на шинах напряжением 6 квт генераторной мощности более 25.000 квт, а на шинах напряжением 10,5 более 50.000 квт.

является практически совершенно неосуществимым. Если подсчитать нормальный ток для первого и второго случаев, то мы получим величины порядка 2.500 амп. Для еще больших токов самая ошिनковка является уже затруднительной. Но с этим можно было бы справиться помощью специальных мероприятий, если бы не те трудности, с которыми связано само конструирование аппаратуры, надежно работающей при дефектах и коротких замыканиях в системе. Получаемые термические и динамические усилия так велики, что при выходе из указанных пределов мощностей гарантировать бесперебойность и спокойную работу установки не представляется возможным.

В случае, когда необходимо коммутировать еще большие мощности на генераторном напряжении, как это имеет место при снабжении больших фабрично-заводских комбинатов (типа Магнитогорск и пр.), приходится идти на целый ряд мероприятий, обеспечивающих надежное решение задачи. К числу наиболее часто применяемых приемов относится деление сборчательно-распределительных шин на несколько отдельных секций, питаемых генераторами общей мощностью равной цифрам, указанным выше (в зависимости от напряжения) и соединенных между собой реакторами, т.е. реактивными сопротивлениями, уменьшающими величину тока короткого замыкания до пределов, которые вызывают допустимые термические и динамические напряжения в аппаратуре, и поддерживающими напряжение в установке при коротком замыкании за ними.

Из особо распространенных схем коммутации мощных станций на генераторном напряжении укажем на системы — прямую (А), кольцевую (В) и звезду (С), изображенные на рис. 5.

В нормальных условиях (схема А) мощность фидеров каждой секции соответствует мощности генераторов, ее питающих, так что никакого протекания значительного тока через реактор нет, но система находится в состоянии параллельной работы. При выпадении одного из генераторов питающие фидеры переходит к остальным.



при чем энергия, прежде чем попасть на секцию с отключенным генератором, должна пройти один или два реактора, в зависимости от того, по какой секции выпал генератор. Так как в реакторе при прохождении через него тока тратится напряжение, то на разных секциях, а значит и у приемников, включенных в них, будут различные напряжения,

потерей напряжения, но все же не является свободной от некоторых недостатков, напр. в случае расширения станции при кольцевой системе необходимо нарушить условия нормальной эксплуатации и произвести большие переделки.

В схеме С (звезда Скотта) указанные недостатки отсутствуют, так как

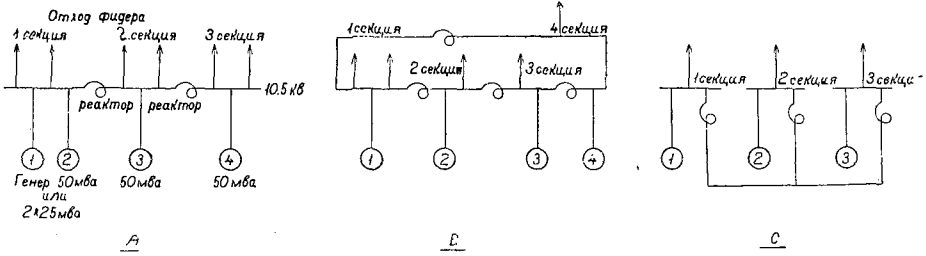


Рис. 5.

что является недостатком схемы А. При коротком замыкании на одной секции напряжение на других, отделенных от места повреждения реакторами, не упадет до нуля, а будет несколько снижено до тех пор, пока выключатель, включенный последовательно с реактором, не произведет отключения боль-

при выпадении одного из генераторов питание этой секции берут на себя в равной доле все генераторы через два реактора, работая в идентичных условиях, результатом чего будет одинаковое напряжение на всех секциях, кроме большой.

Недостатком схемы звезды является

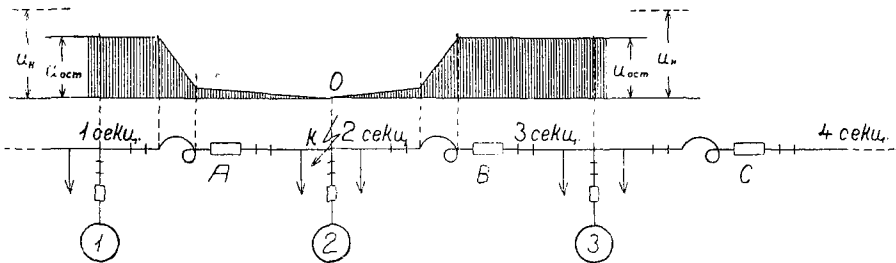


Рис. 6.

шой секции. Это действие реактора мы поясним несколько ниже.

Отмеченные недостатки схемы А особенно резко выступают в эксплуатации, когда число секций будет больше трех. В таком случае лучше перейти к схеме В или С, вообще говоря равнозначным по своим достоинствам. Схема В (кольцо) обладает большими преимуществами перед схемой А в смысле надежности питания любой секции от соседних с меньшей

необходимость в особой шине, на которую включаются концы всех реакторов. Действие реактора в смысле его благоприятного влияния на поддержание напряжения на здоровых секциях можно проследить на рис. 6, представляющем часть прямой или кольцевой системы. Допустим, что у нас на 2-ой секции в точке К произошло короткое замыкание. Генератор 2, снабженный автоматическим выключателем, по истечении времени выдержки реле

отключится. Питание точки *K* генераторами 1 и 3 происходило через реакторы, т. е. уменьшенными по сравнению с генератором 2 токами. Напряжения на 1 и 3 секциях от нормального  $U_{\text{пор.}}$  упало до  $U_{\text{ост.}}$ , но не спустилось до нуля, так как главное падение, как видно из чертежа, происходит в реакторах. Это остающееся напряжение может быть подсчитано по формуле:

$$U_{\text{ост.}} = U_{\text{пор.}} \frac{X_p}{X_2 + X_p},$$

где  $X_p$  и  $X_2$  соответственно обозначают реактивные сопротивления реактора и генератора секции (если последних на секцию несколько, то надо взять их общее, результирующее сопротивление).

Пропускная способность реакторов при прямолинейной кольцевой системе берется 75%, а при звезде—100% мощности одного генератора и при индуктивности реактора равной до 10%, это значит, что при прохождении соответственного тока, принятого за нормальный, отношение  $\frac{I_n X_p}{U_{\text{пор.}}} \cdot 100 = X\%$  будет равно 10%. Здесь  $U_{\text{пор.}}$  обозначает нормальное фазовое напряжение установки.

Районные электрические станции в зависимости от того, снабжают ли они энергией отдаленные или близлежа-

щие центры потребления, могут иметь несколько принципиальных схем, обобщенных на рис. 7. Схема *A* представляет собой принципиально выдержанное устройство, по которому генератор и трансформатор представляют единое целое, т. е. рассматриваются и включаются как единица, как блок. Схема *B* отличается тем, что станция оборудована 3-хобмоточными трансформаторами и одновременно может отпускать энергию напряжением 110 кв и 38 кв, при чем первым снабжаются отдаленные, а вторым близлежащие потребители. Наконец, схема *C* дает иное решение той же задачи. Каждая система напряжений имеет отдельные блоки (генератор, трансформатор), а для взаимного резервирования устанавливается генератор с трехобмоточным трансформатором или особый трансформатор связи, который, в виду того, что направление энергии может меняться и он работает как понижающий и повышающий (реверсирование), берется регулируемым.

Иногда районные станции, находящиеся в центре потребления и снабжающие отдаленных потребителей, могут коммутироваться по схеме, позволяющей одновременно или разновременно работать как на генераторном напряжении, так и через трансформатор (рис. 8).

Схема рис. 8 *A* изображает обычно применяемое устройство для подобного рода станций. При этом необходимо иметь в виду, что общая мощность параллельно работающих на генераторном напряжении машин не должна быть больше при 6.000 в 25.000 квт, а при 10.500—50.000 квт, по причинам,

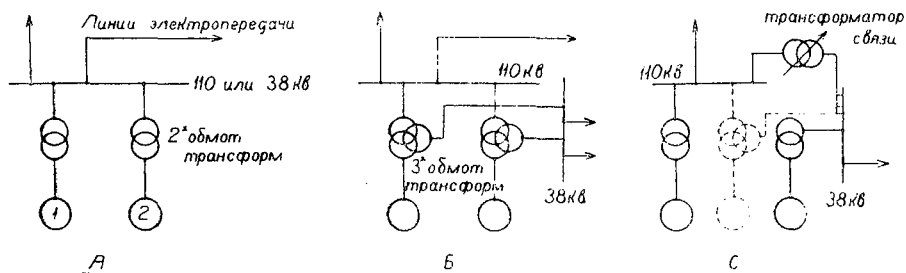
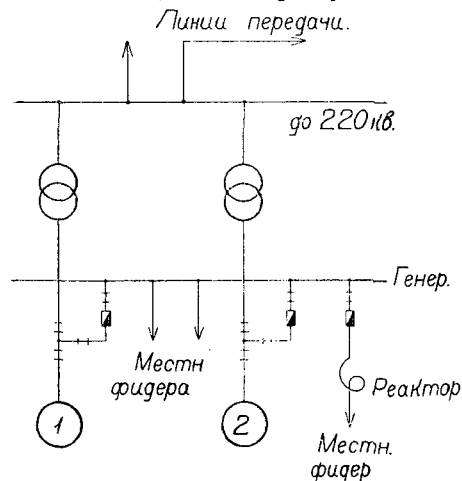


Рис. 7.

щие центры потребления, могут иметь несколько принципиальных схем, обобщенных на рис. 7. Схема *A* представляет собой принципиально выдержанное устройство, по которому генератор и трансформатор представляют единое целое, т. е. рассматриваются и включаются как единица, как блок. Схема

изложенным выше. Каждый генератор может работать на шины местных фидеров или на линии электропередачи, или на те и другие вместе. Схема рис. 8 *B* в своей правой части представляет обычную станцию, снабженную двойной системой полюсов на генераторном напряжении, от которых питаются мест-

ные фидера. Повысительные для линий передач трансформаторы рассматриваются как подобные же фидера. Эта система применима тогда, когда мощность каждого генератора больше



A

Рис. 8А.

потребления линиями высокого напряжения. Если же мощность, потребляемая трансформатором, с течением

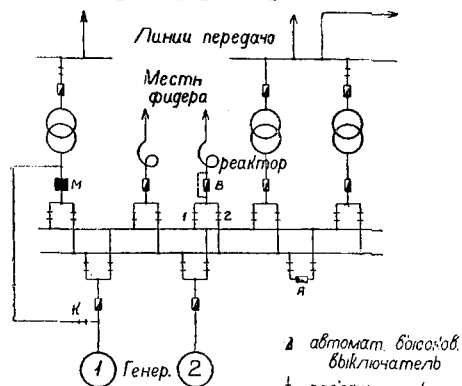


Рис. 8В.

времени возрастает и начинает близко подходить к мощности генератора, то устривают переключку, замыкая разъединитель *К* и отключая выключатель *М* с соответствующими разъединителями. Тогда генератор и левый трансформатор будут работать как единица, как блок, а правая часть питать мест-

ные фидера. Междущинный выключатель *А* может быть применен как резервный для любого из выключателей, для чего следует замкнуть его оба разъединителя, а ответвление (фидер или трансформатор) перевести на другую систему шин. Допустим, мы работаем на верхней системе шин и испортился фидерный выключатель *В*. Включая выключатель *А*, мы при замыкании его разъединителях даем напряжение на нижнюю систему шин. Закладывая разъединитель *2* и отключая *1*, мы фидер перевели на питание с нижних шин, после чего можно отключить выключатель *А*. Если после осмотра оказалось, что выключатель *В* испорчен и непригоден к работе, то на нем делают переключку (см. пунктир) и продолжают работать через выключатель *А*. Так обр., шинный соединительный выключатель *А* является необходимой принадлежностью при двойной системе шин, применяемой всегда на ответственных станциях. Для уменьшения сечения сети и облегчения аппаратуры у потребителей при мощных генераторах на каждом фидере ставят реактор подходящей реактивности (порядка от 3 до 10%).

К числу ответственных потребителей всякой электрической станции относятся приводные механизмы самой станции, объединяемые под названием «собственные нужды». Для их удовлетворения применяются различные схемы снабжения. Наиболее распространенной является схема питания от главных сборных шин непосредственно или через понизительный трансформатор. В целях исключения влияния неисправностей в системе собственного расхода на главную установку и обратно, применяют отдельные турбогенераторы, так называемые домашние, от которых совершенно изолированно питаются собственные нужды. Однако, домашняя турбина, имея мощность до 10% главных, является менее экономичной в работе, и производство ею одного квтчаса обходится дороже получаемого от главных шин. Иногда, в целях разделения всей установки на отдельные части, независимые от неисправностей в других, применяют особые домашние генераторы, сидящие

на валу с главными и снабжающие энергией двигателя всех вспомогательных механизмов, принадлежащих только к соответствующей части установки. Котел (или группа в несколько котлов), турбо-генератор, трансформатор и линии являются составными элементами одной части станции, т. н. блоком. Собственные нужды которого и обслуживаются этим домашним генератором. Современная тенденция применения для приводов собственных нужд коротко замкнутых асинхронных двигателей больших мощностей (порядка 1.000 квт) обуславливает предпочтение системе питания от главных шин.

Выбор той или иной схемы электрического соединения на станции зависит от ее мощности и назначения, местонахождения приемников и соотношения мощностей, подаваемых при различных напряжениях. Коммутационная схема каждой станции должна обеспечить наиболее целесообразную связь основных ее элементов, облегчить эксплуатационные переключения и обеспечить надежность манипулирования при нормальных условиях и при аварии. Кроме того, установка, построенная по данной электрической схеме, должна быть технически совершенной и рентабельной в нормальной эксплуатации.

2. *Выбор аппаратуры на электрических установках* производится, принимая во внимание величину нормального напряжения, нормальную силу тока, характеризующие нормальный режим работы и значения токов короткого замыкания и возможных перенапряжений для ненормального или аварийного режима установки. Ниже мы приведем ряд соображений, связанных с выбором некоторых наиболее важных элементов оборудования.

Наиболее простой аппарат—выключатель, служащий для разрыва цепи под током, в том или ином виде известен всякому. Детали устройства его зависят от величины силы тока и напряжения, т. е. разрываемой мощности. Основное требование к контактам выключателя заключается в том, чтобы они при прохождении нормального тока не перегревались выше 50° сверх окружающей среды. Температура перегрева зависит от величины пере-

ходного сопротивления между контактами, которое может быть приближенно выражено формулой:

$$R_k = \frac{K}{F \cdot p} = \frac{K}{P},$$

где  $K$ —постоянная, зависящая от материала и обработки контактов,  $F$ —поверхность соприкосновения,  $p$ —давление в кг/см и  $P$ —общее давление в кг. Конечно, этот закон справедлив только в известных пределах; для щеточных контактов, например, до тех пор, пока каждая пластина прижата всей своей поверхностью соприкосновения. Если далее увеличивать давление, то угол наклона каждой пластины и всей щетки уменьшается, и поверхность соприкосновения также уменьшается. Хотя произведение из поверхности на давление остается постоянным, но переходное сопротивление возрастает. Так как с течением времени контакты всегда окисляются, то при расчете переходного сопротивления и возможного падения в них напряжения, а значит и температуры, рекомендуется для надежности в расчет вводить трехкратную величину значений для коэффициента  $K$ , даваемых обычно в таблицах.

Плотность тока в выключателе, кроме переходного сопротивления, зависит от условий и поверхности охлаждения, величины выключателя и пр. и колеблется в широких пределах от 0,1 до 0,2 А/мм<sup>2</sup>.

Рубящие выключатели строятся до 400 А, щеточные же до сил токов в 10.000 А. При наличии воздушного выключателя защита установки от перегрузки и токов короткого замыкания осуществляется помощью предохранителя, состоящего из конструкции, поддерживающей плавкую вставку и позволяющей легко заменять последнюю при ее перегорании. Широко известный предохранитель на доколе из шифера или мрамора и предохранитель с проходными болтами для крепления на распределительной доске установки употребляются наиболее часто.

Подобные конструкции, употребляемые для сил тока порядка до 4.000 А, монтируются за распределительными досками, так как при сгорании вставки материал последней (свинец, сплав

олова и свинца) частью образует газообразные продукты, частью же разбрызгивается и может явиться причиной несчастия с обслуживающим персоналом. Исключение составляет вставка из серебра, при сгорании не выделяющая почти совсем газов, закапчивающих окружающие аппараты распределительного устройства. Смена сгоревшей вставки производится помощью гаечного ключа, при чем схему соединения установки необходимо так осуществлять, чтобы эта работа не была бы производима под напряжением. Если хотят смену вставки выполнять более удобно, то останавливаются (для рабочих токов до 1.000 А) на конструкции рубящих предохранителей. Предохранители с плавкими вставками употребляются для напряжений до 750 вольт.

Сила тока, плавящая предохранитель, определяется по формуле Приса

$$I = a \sqrt{d^3},$$

где  $d$ —диаметр проволоки в мм, а  $a$ —для меди равно 80, для свинца—10,8, для олова—12,8 и сплава 2 частей свинца и 1 части олова—10. Наиболее легкоплавкими материалами являются олово и свинец. Последний наиболее дешев и легче поддается обработке. Наиболее совершенным предохранителем является серебряный, но он дорог и употребляется только в ответственных установках. Самыми распространенными вставками являются свинцовые и состоящие из сплава 2 частей свинца и одной части олова или 60% свинца и 40% олова (вставка Эдисона).

Падение напряжения на предохранителе не должно быть при прохождении нормального тока выше десятых долей вольт.

Недостаток защиты установки помощью предохранителей заключается в том, что при быстром сгорании их они являются причиной перенапряжения. Особенно это заметно в установках постоянного тока. При включении нескольких предохранителей последовательно нет уверенности, что сгорит ближайший к месту короткого замыкания, так как предохранитель имеет зависимую характеристику, т.е. время его сгорания зависит от силы тока,

переходя при больших значениях последнего в мгновенные. Предохранитель выбирается с таким расчетом, чтобы при токе, превышающем нормальный на 100%, он расплавился бы в течение одной минуты. В ответственных установках постоянного тока их заменяют поэтому автоматическими, а в установках переменного—низкого напряжения очень часто, а высокого всегда—масляными выключателями.

Наиболее часто встречаются на станциях автоматические выключатели: а) максимальные и б) минимальные, включаемые в расщелку проводов. Как показывает само название, одни действуют при достижении верхнего, а другие—нижнего предела допустимой возможной по условиям эксплуатации силы тока. На рис. 9 даны наиболее

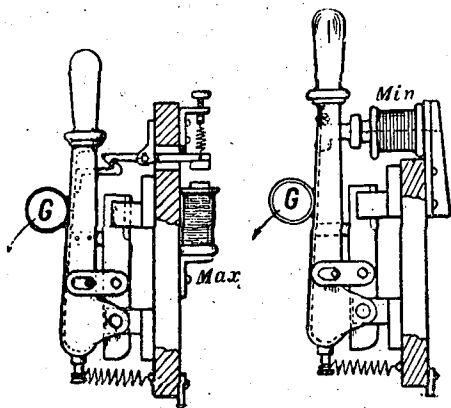


Рис. 9.

простые конструкции подобных автоматов. Максимальный выключатель (слева) обладает катушкой „Max“, через которую протекает рабочий ток. Если сила последнего превзойдет наперед заданные пределы, то находящийся сверху катушки якорек притянется, освободит защелку, и выключатель под действием груза  $G$  и нижней пружины будет выключен. Установка тока выключения производится натяжением пружинки, соединенной с якорком. Справа дан минимальный автоматический выключатель, который прервет цепь рабочего тока, если величина последнего упадет ниже наперед установленного предела. В этом случае сила тока, обтекающего катушку „Min“,



замыкания установка воздушных автоматических выключателей. Предпочтительней, однако, по удобству обслуживания и надежности в работе на станциях переменного тока от 525 вольт и выше устанавливать масляный автоматический выключатель, представляющий собой обычный выключатель,

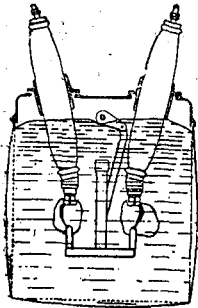


Рис. 12.

опущенный в масло (рис. 12). При расхождении контактов масляного выключателя между ними при разрыве цепи под током появляется дуга, разлагающая и испаряющая масло и протекающая таким образом в газовой среде. Давление последней повышается и заставляет кожух изгибаться, ставя тем требование к достаточной механической прочности последнего. Над контактами должна быть достаточная высота масла, чтобы газы, уходя вверх, успели остыть; иначе они, соединяясь с воздухом, могут вызвать

причину взрыва масляника. Разрыв переменного тока происходит в современных конструкциях надежно в течение, примерно, 0,03 сек. Однако, этого времени достаточно, чтобы образовалось внутри большое количество газа, об отводе которого необходимо также позаботиться. В настоящее время в связи с имевшими место взрывами масляных выключателей начали применять всевозможные усовершенствования в конструкции: масляное

дутье, деионные решетки и различные безмасляные выключатели — деион, со сжатым газом и с расширением паров жидких смесей. Все они, хотя и стоят дороже масляных выключателей, но обладают высокоценным свойством надежной работы без риска взрыва. Чтобы сделать масляный выключатель автоматом, применяют так наз. реле, т.е. особые аппараты, замыкающие контакты *a* и *b* вспомогательной цепи постоянного тока, в которую введена выключающая катушка

*M* масляного выключателя *B* согласно схеме (рис. 13). Если в сети будет перегрузка, то через обмотку максимального реле *MP* пройдет ток выше нормального, якорек максимального реле втянется и замкнет контакты *a* и *b*, т.е. постоянный ток обтечет выключающую катушку *M*, которая действует на защелку или иное приспособление, удерживающее масляный выключатель во включенном состоянии, и под влиянием напряжения пружины *F* масляный выключатель будет выключен.

Величина тока выключения устанавливается в различных реле различными способами: помощью пружин, грузов и т. д. Подобные реле можно выполнять также с установкой на время, если по условиям эксплуатации необходимо осуществить не мгновенное выключение, а с выдержкой времени. В настоящее время имеется целый ряд всевозможных реле, помощью которых обеспечивается надежность работы всех элементов установки и которые имеют своей основной задачей сообщить станции автоматичность и селективность защиты, гарантирующей

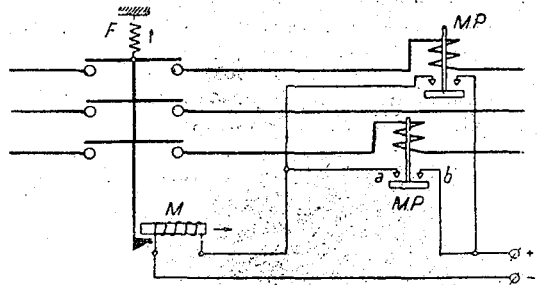


Рис. 13.

отключение со всех сторон питания дефектного участка.

Реле бывают для защиты от: 1) перегрузки, 2) замыкания на корпус в генераторе, 3) замыкания между витками отдельных фаз или витков одной из фаз, 4) повышения или понижения напряжения и т. д., при чем управляющим является сила тока, напряжение установки, напряжение смещения нулевой точки, мощность и ее направление, сопротивление полное (импеданс) и индуктивное, разность и сумма то-

ков и т. д. В каждом отдельном случае как характер защиты, так ее установка по времени и чувствительность должны быть предметом подробного обдумывания, так как неосторожность или непродуманная поспешность в деле установления защиты может быть причиной тяжелых повреждений и аварий при эксплуатации.

Для реле, счетчиков, ваттметров и прочих измерительных приборов при переменном токе с напряжением выше 525 вольт необходимым является применять не шунты, а трансформаторы тока, включаемые в расщелку проводов. Трансформатор тока представляет собой замкнутый железный сердечник (во избежание больших токов Фуко набранный из листового железа), на котором намотаны две обмотки: первичная, обтекаемая рабочим током, с малым числом витков, и вторичная — с большим числом витков, при чем таким, чтобы в ней проходило при полной нагрузке первичной обмотки пять ампер, реже 1 или 10 амп. Таким образом отношение числа витков вторичной и первичной обмоток будет равно отношению пяти к величине нормального тока установки. Для безопасности обслуживания персонала необходимо заземлять один конец вторичной обмотки трансформатора тока.

Общий вид трансформаторов тока на 500—1.000 А показан на рис. 14.

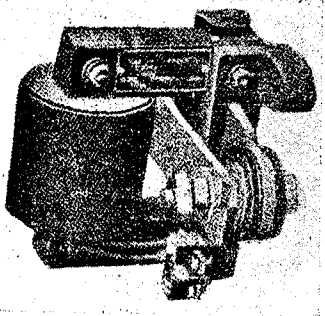


Рис. 14.

Значение в 5 А во вторичной обмотке взято для возможности точных измерений приборами на 5 А и 110 в. Поэтому добавочные сопротивления для обмоток напряжения киловаттметра,

счетчика и вольтметра выполняются с тем расчетом, чтобы на зажимах прибора было всегда 110 в. На станциях с напряжением 525 в и выше ставят для понижения напряжения в измерительных приборах до 110 в особые понижительные измерительные трансформаторы напряжения.

Как было указано ранее для автоматического выключения, включения на расстоянии необходимо иметь источник постоянного тока, независимого от напряжения установки. В качестве последнего употребляются аккумуляторные батареи или гальванические элементы напряжением от 110 до 240 в.

Для сбора и распределения электрической энергии на электрических станциях малой мощности устраиваются особые полюсы, именуемые часто шинами. Они выполняются обычно из меди, алюминия и редко железа. Величина их сечения определяется, исходя из соображения допустимого нагревания сверх окружающей среды, но не выше 40°C. Имея величину установленной мощности на

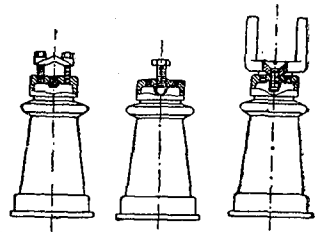


Рис. 15.

станции и вычисляя возможную наибольшую силу тока установки, мы по существующим для этого таблицам определяем сечение шин, при котором перегрев их не будет выше допустимого. Если получается несколько полюсов, то расстояние между ними по существу для этого таблицам определяем сечение шин, при котором перегрев их не будет выше допустимого. Если получается несколько полюсов, то расстояние между ними по существу для этого таблицам определяем сечение шин, при котором перегрев их не будет выше допустимого. Если получается несколько полюсов, то расстояние между ними по существу для этого таблицам определяем сечение шин, при котором перегрев их не будет выше допустимого. Если получается несколько полюсов, то расстояние между ними по существу для этого таблицам определяем сечение шин, при котором перегрев их не будет выше допустимого.



коротком замыкании получаются большие электродинамические усилия между шинами, вызванные прохождением больших токов. Расстояние между шинами, так же как и между токоведущими неизолированными частями, выбирается в соответствии с напряжением установки.

Высоковольтные масляные выключатели выбираются по: 1) номинальному напряжению, 2) номинальной силе тока, 3) предельной выключаемой мощности при данном напряжении (или предельному выключаемому току при том же напряжении), 4) односекундному току (эффективному), 5) пятисекундному току (эффективному) и 6) по амплитуде скачка тока короткого замыкания (электродинамическая устойчивость). Первые два показателя пояснения не требуют. Предельной выключаемой мощностью, при данном напряжении называется произведение из предельной выключаемой силы тока на напряжение и на  $\sqrt{3}$ .

Односекундный ток дан в амперах для указания того, что масляные выключатели не должны подвергаться действию тока короткого замыкания, максимальное эффективное значение которого превышает данные, приведенные в каталогах в графе „односекундные токи“. Так обр. величина допустимого эффективного значения скачка тока короткого замыкания не должна превышать величину „односекундного тока“. Пятисекундный ток, определяющий термическую устойчивость масляного выключателя, нужен для того, чтобы иметь уверенность в надежной работе выключателя после того, как через него в течение  $t$  сек. будет проходить какой-то ток  $I_t$ , выделяющий определенное количество тепла. При подсчете допустимых величин токов в течение  $t'$  сек величину тока, указанную в данном столбце (каталог ВЭТ), надлежит разделить на квадратный корень из отношения времени  $t$  к 5 секундам, т. е.

$$I_t = \frac{I_{\text{катал}}}{\sqrt{5t'}}$$

Возвысив обе части этого равенства в квадрат, будем иметь  $I_t^2 t' = I_{\text{кат}}^2 \cdot 5$ ,

т. е. количество теплоты, выделяемое током каталога в течение пяти секунд (являющееся предельно допустимым для термической устойчивости масляника), не должно быть больше того количества теплоты, которое выделит ток  $I_t$ , протекая  $t$  сек.

В конкретной обстановке данной станции мы имеем установившийся ток короткого замыкания, определенный тем или иным образом (см. М. Ф. Полярков, Электрооборудование ЦЭС\*). Для определения температуры перегрева токоведущих частей при прохождении тока короткого замыкания имеем для кабеля формулу:

$$\theta^0 = \left( \frac{I_{\text{кор. ск}}}{q} \right) \left[ \left( \frac{I_{\text{кор. ск}}}{1,8 I_{\text{уст}}} \right)^2 0,6 + t \right] 0,0063.$$

Ее можно несколько преобразовать:

$$\theta^0 = \frac{1}{157} \left( \frac{I_{\text{уст}}}{q} \right)^2 \left[ t + \left( \frac{I_{\text{к.р. ск}}}{1,8 I_{\text{уст}}} \right)^2 0,6 \right]$$

$$\text{или } \theta^0 = \frac{1}{157} \left( \frac{I_{\text{уст}}}{q} \right)^2 (t + \Delta t), \text{ где } \Delta t = \frac{I_{\text{кор. ск}}}{1,8 I_{\text{уст}}} \cdot 0,6.$$

Здесь  $t$  — выдержка времени реле, а  $\Delta t$  определяется характером спада кривой тока короткого замыкания в зависимости от времени. Значения  $t + \Delta t = t'$  и  $I_t = I_{\text{уст}}$ , будучи подставлены в формулу для проверки термической устойчивости масляника, определяют величину  $I_{\text{катал}}$ , которая должна быть равна или меньше значений, указанных в графе каталога „пятисекундный ток“. Несколько более точно, но сложнее, эту максимальную пятисекундную величину тока, эквивалентного по своим термическим последствиям действительно протекающему через масляник току  $I_{\text{уст}}$  в течение  $t + \Delta t = t'$  секунд, можно определить методом Бирманса, пользуясь построенными им кривыми.

Термическое действие тока короткого замыкания, не остающегося постоянным в течение всего времени переходного режима подсчитать, вообще говоря, без ряда допущений чрезвычайно затруднительно. Однако, смысл всех приемов определения этого действия заключается в том, что действительное время протекания тока короткого замыкания от его начала до включения заменяется действием постоянной ве-

личины установившегося тока короткого замыкания, но длительностью  $t' = t + \Delta t_{сек.}$ , называемой „фиктивным временем“ (зависящим от отношения  $\frac{I_{кор. ск.}}{1,8 I_{уст}}$ ), в течение которого этот установившийся ток выделит то самое количество теплоты, которое за время длительности короткого  $t$  выделит действительный ток, изменяющийся по своей величине с течением времени. Бирманс построил кривые, изображенные на рис. 16, которые по действительной выдержке времени реле  $t$  дают значение „фиктивного времени“  $t'$  для трех и двухплюсового короткого замыкания в зависимости от отношения  $\frac{I_a}{s}$ , где  $I_a = \frac{I_{кор. скач. эфкт.}}{1,8}$ , а  $I_s = I_{установ.$

Например. Пусть мы имеем установку, в которой  $\frac{I_a}{I_s} = \frac{I_{кор. ск. эф.}}{1,8 I_{уст}} = 3$ , время выдержки реле пусть будет  $t=3,5$  сек. По кривой для 3 (цифра справа) находим соответствующее 2 сек. фиктивное время  $t'=5,3$  сек. (для трехплюсового). Тогда полное время  $t'=5,3 + (3,5-2)=6,8$  сек. Подставляя его в вышеприведенную формулу для пятисекундного тока, определяем величину последнего  $I_{кат} = I_{уст} \sqrt{\frac{6,8}{5}}$ .

Для проверки выбранного масляника на динамическую устойчивость необходимо найти амплитуду скачка тока короткого замыкания, которая определяется величиной односекундного тока (эффективное значение скачка тока короткого замыкания)

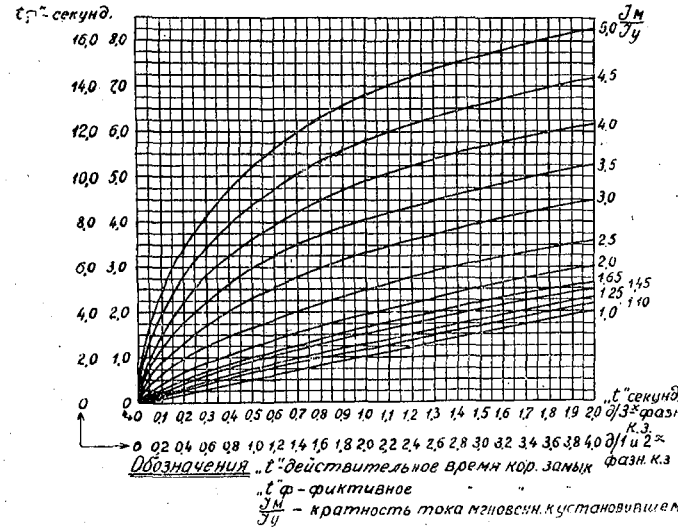


Рис. 16.

При пользовании этими кривыми необходимо только помнить, что они даны для времени неустановившегося режима, равного обычно 2 сек. Если, например, заданная выдержка времени  $t=3,5$  сек., то фиктивное время находится для 2 сек. и к полученной величине прибавляется  $3,5-2=1,5$ . Найденная общая длительность  $t'$  и является величиной полного времени действия установившегося тока короткого замыкания, которую и вставляют в формулу  $I_{уст} t' = I_{катал. 5}$ .

на некоторый постоянный коэффициент, учитывающий разницу между эффективным значением данной периодической кривой и ее амплитудой. Для синусоидальных кривых этот коэффициент равен  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ . Так как кривая тока короткого замыкания в первые доли секунды не синусоида, то значение этого коэффициента можно определить следующим образом. Ток короткого замыкания в его неустановившемся режиме может быть приближенно заменен двумя токами — периодической или переменной составляющей и составляющей постоянного знака. Можно положить, что амплитуда переменной составляющей будет равна  $I = \sqrt{2} I_{эф. перем.}$ , как это имеет место при синусоиде. Эффективное значение полного тока короткого замыкания будет равно

$$I_{пол} = \sqrt{I_{пост}^2 + I_{эф. перем}^2}$$

Для самого неблагоприятного момента включения, когда значение постоянной составляющей будет наибольшее, величина ее будет равна величине амплитуды переменной составляющей, и тогда

$$I_{\text{пол}} = \sqrt{(I_{\text{эф}}^{\text{пер}} \sqrt{2})^2 + I_{\text{эф}}^2} = 1,73 I_{\text{эф}}^{\text{пер.}}$$

Согласно опытам Рюденберга, величина амплитуды скачка тока короткого замыкания будет равна  $I_{\text{ск}} = 1,8(\sqrt{2} \cdot I_{\text{эф}})^{\text{пер.}}$

так как предполагается, что постоянная составляющая в течение первой полуволны тока короткого замыкания, когда обе они складываются, претерпит некоторое уменьшение. Беря отношение амплитуды к эффективному значению скачка тока короткого замыкания, мы получим значение этого коэффициента:

$$K = \frac{1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{эф}}^{\text{пер}}}{1,73 I_{\text{эф}}^{\text{пер}}} = 1,47.$$

Американцы считают, что постоянная составляющая в течение первой полуволны тока короткого замыкания не уменьшается и остается равной амплитуде переменной составляющей. Тогда этот коэффициент будет равен:

$$K = \frac{I_{\text{ск}}}{I_{\text{ск.эф}}} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{эф}}^{\text{пер}}}{1,73 \cdot I_{\text{эф}}^{\text{пер}}} = 1,63.$$

Так как за односекундный ток, даваемый каталогом ВЭТ, взято эффективное значение тока короткого замыкания и масляники в СССР делаются по американским конструкциям, то для получения величины тока, определяющего динамическую устойчивость выключателя, необходимо данные для односекундного тока помножить на 1,63. Так. обр., эффективное значение скачка тока короткого замыкания, существующее в данной установке, меньше, чем данный масляник имеет по каталогу, гарантирует установку в том, что при коротком замыкании масляник будет в должной мере обладать электродинамической устойчивостью.

Измерительные трансформаторы тока выбираются в зависимости от: 1) класса

точности, 2) нормального тока, 3) мощности, 4) термической устойчивости, 5) динамической устойчивости и 6) нормального напряжения первичного тока.

В зависимости от того, какие приборы включены на вторичную обмотку трансформатора тока, т.е. требуют они точного показания или нет (к первым относятся измерительные приборы и счетчики, а ко вторым — различного рода реле), выбирается класс точности, к которому должен принадлежать трансформатор. Мощность последнего определяется классом точности и сопротивлением вторичной цепи. Это сопротивление, как состоящее из сопротивления последовательных обмоток включенных проводов (включая переходное сопротивление контактов) может быть легко определено, ибо заводы, изготовляющие приборы, дают сопротивление последних. Сопротивление проводов может быть определено по их длине и сечению, а всех контактов — ориентировочно принимается равным 0,1 ома.

Термическая устойчивость трансформатора тока определяется как «способность трансформатора выдерживать без повреждений нагрева, вызываемые током короткого замыкания». Согласно предыдущему (см. выбор масляника) мы имеем  $I_1^2 t' = I_{\text{кат}}^2 \cdot 5$ . Если взять величину односекундного тока, то мы будем иметь  $I_1^2 t' = I_1^2 \cdot 1$ , или  $I_{\text{уст.}}^2 t' = I_1^2 \cdot 1$ .

Отсюда легко определить величину односекундного тока  $I_1$  и по нем найти термическую кратность по отношению нормального тока. Изготавливаемые ВЭТ трансформаторы имеют 85-кратную или иную данную величину.

Динамической устойчивостью трансформатора тока называют способность противостоять механическим усилиям, развивающимся при коротких замыканиях. Динамическая кратность будет поэтому называться отношением амплитуды начальной полуволны к амплитуде нормального тока, т.е.

$$K = \frac{1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{пер}}^{\text{эф}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{нор}}}.$$

Величина этого отношения не должна выходить из пределов, указанных в каталоге.

При выборе трансформаторов тока на подстанциях, питаемых от больших объединений, вопрос о проверке их на динамическую и термическую устойчивость приобретает актуальное значение. Поэтому для маломощных фидеров приходится трансформаторы тока иногда ставить на большую, чем нормальная, силу тока (тогда кратность понижается), и точность защиты тем уменьшается. Последняя работает только при коротких замыканиях, но не при перегрузках. Можно было бы пойти по пути уменьшения вторичного тока, но это связано с изменением конструкции трансформатора, что с точки зрения

Токоведущие части выбираются по нормальному току и проверяются по термическому и динамическому действию тока короткого замыкания.

Остальные аппараты распределительного устройства подстанции выбираются по нормальному току, нормальному напряжению, величинам скачка и установившегося тока короткого замыкания, а также по соображениям координации изоляции всей установки.

Выбор изоляторов на станциях производится по нормальному напряжению, напряжению перекрытия и по механическому усилию, которое прихо-

### Однолинейная СХЕМА коммутации

Зуевской государственной районной электрической станции  
Колосова

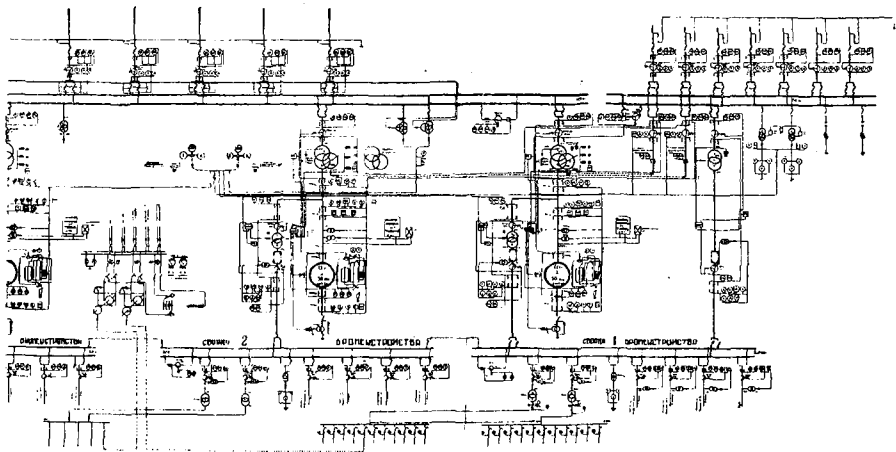


Рис. 17.

стандартности в их изготовлении едва ли можно считать рациональным. Поэтому для защиты от перегрузки фидеров, снабженных реакторами, часто ставятся добавочные трансформаторы тока после реактора (первые должны стоять до реактора, чтобы отключать фидер при коротком замыкании в самом реакторе), так как там имеются уменьшенные значения кратностей.

При защите трансформатора часто реле перегрузки включают на низковольтной стороне, но заставляют его действовать на масляник стороны низшего напряжения.

дится на каждый из них при коротком замыкании от электродинамического действия амплитуды начального скачка тока. При параллельном размещении шин, с расстоянием между ними в  $a$  см, усилие на каждый погонный метр длины определяется по формуле:

$$P = \frac{2,04 (1,8 \cdot \sqrt{2 \cdot I_{\text{эф.пер}}})^2}{a \cdot 10^6} \text{ кг/метр.}$$

В заключение для ориентировки в электрических схемах и для примера выполнения мы приведем однолинейную схему Зуевской районной электрической станции (рис. 17), на которой

установлено три турбогенератора по 50.000 квт. с напряжением 10,5 кв. по схеме генератор - трансформатор — одно целое, или блок. Так как питать энергией необходимо приемники, находящиеся на различных расстояниях, то установлены трехобмоточные трансформаторы 10,5 — 38/115 кв. Шины как второго и третьего напряжения взяты с 10,5 кв. Для питания собственного расхода каждого генератора до повысительного трансформатора предусмотрена отпайка на регулируемый под нагрузкой трансформатор мощностью 7.500 квт, работающий с напряжением 3,5 кв. на соответствующую сборку, выполненную по способу броневого распределительного устройства и питающую соответствующие приводы для данного блока.

В случае порчи одного из трансформаторов собственного расхода имеется резервный той же мощности, включенный на напряжение 38 кв. и через переключки на верхних шинах сборки броневых устройств питающий двигатели любого блока.

Для обслуживания реле, сигналов, управления на расстояние, аварийного освещения и пр. предусмотрена емкостная аккумуляторная батарея.

Отходящие линии 115 кв. защищены дистанционными реле (*DR*), радиальные же линии 38 кв. — максимальными (*MR*), трансформаторы максимальными (*MR*), дифференциальными реле (*DR*) и газовым реле Бухгольца (*Bh R*), а генератор (от перегрузки) — максимальными (*MR*), включенными ближе к нулю. От замыкания между фазами предохраняет дифференциальное реле (*DR*), а от заземления (замыкания на корпус) — реле заземления (*ER*). Для поддержания напряжения установлен на каждом генераторе автоматический регулятор Тиррилла. Для включения генераторов на параллельную работу предусмотрены две колонки синхронизации, питаемых от трансформаторов напряжения одной из систем шин 115 и 38 кв.

Защита отходящих фидеров с бронесборок собственного расхода произведена максимальным реле, установленным на двух фазах.

Для производства измерений всех электрических величин и контроля изо-

ляции предусмотрены соответствующие приборы, включенные через трансформаторы тока и напряжения.

Литература: М. Ф. Поляков, „Центральные электрические станции“; I. G. Tarboux, „Electric Power Equipment“; L. W. Morrow, „Electric Power Stations“; L. Vellard, „Stations centrales et sous-stations“; I. Waltjen, „Schaltanlagen für Prestromkraftwerke“.

М. Поляков.

### VIII. Передача электрической энергии.

Для передачи электрической энергии на расстояние (ср. XXXI, прил. к стб. 487/88) применяется напряжение, величина которого должна соответствовать, во избежание чрезмерных потерь, передаваемой мощности и расстоянию. Вообще говоря, с увеличением дальности электропередачи должно увеличиваться напряжение, но при повышении напряжения капитальные затраты тоже повышаются и становятся экономически целесообразными только при мощности не ниже определенной величины. В табл. I показаны ориентировочные величины расстояния и мощности для различных напряжений по линиям заданного сечения (при медных проводах).

Таблица I.

Пределы передачи электроэнергии при различном напряжении.

Напряжение в кило-вольтах	Число линий, число проводов поперечное сечение.	Расстояние	Мощность
60	2 × 3 × 120 мм <sup>2</sup>	100 км.	48 мегаватт
110	2 × 3 × 120 мм <sup>2</sup>	200 "	81 "
200	2 × 3 × 210 мм <sup>2</sup>	400 "	280 "
220	2 × 3 × 400 мм <sup>2</sup>	600 "	360 "
380	2 × 3 × 400 мм <sup>2</sup>	800 "	800 "

В качестве иллюстрации к таблице может служить показанный на рис. 1 проект схемы высоковольтной передачи, соединяющей норвежские гидростанции с баварскими, хотя эта схема в условиях капиталистического хозяйства и не будет осуществлена. В СССР самая длинная линия электропередачи напряжением в 220 киловольт построена к началу 2-й пятилетки как линия, соединяющая Свирскую гидростанцию с Ленинградом (242 км).

Система передачи электрической энергии состоит из *повысительной подстанции*, на которой напряжение доводится до требуемой величины,

одной или нескольких параллельных линий электропередач и понижительной подстанции. Если по пути следования высоковольтной линии передачи является необходимым сделать ответвление для передачи части мощности в ту или другую сторону без изменения передаваемого напряжения, то в соответствующих местах устраиваются переключательные пункты. Как правило, на магистральных линиях передач избегают устройства таких переключательных пунктов.

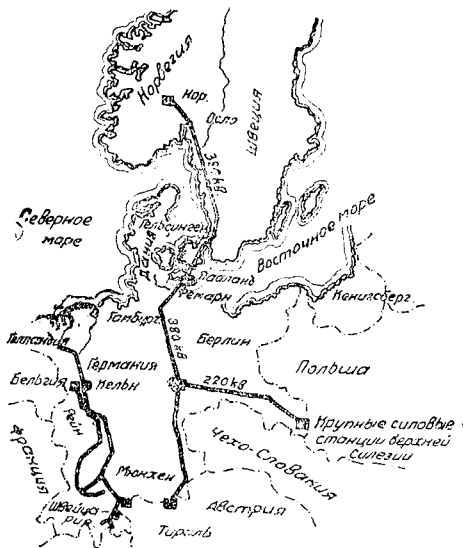


Рис. 1. Проект соединения электростанций Средней Европы в единую сеть электропередач. Передачу энергии через море между Лаалаанд и Фемарн (120 км) предполагается осуществить кабелем 100 кв. В Лаалаанд и Фемарн намечены подстанции 380/110 кв.

Для возможности передачи больших мощностей на более далекие расстояния часто по пути следования линии передачи устанавливаются синхронные компенсаторы \*) (см. электротехника — электромашинь), задачей которых является компенсировать индуктивные токи и связанное с ними индуктивное падение напряжения. Теоретически рассуждая, путем дифференциальной компенсации вдоль линии передачи можно выравнять напряжения по всему пути линии передачи, при чем могут быть заданы весьма

\*) У нас применяется для этих машин и английский термин: синхронный конденсатор.

значительные расстояния передачи энергии, пределы которой будут поставлены только омическими потерями, связанными с передачей энергии по данной линии передачи, и потерями, вызываемыми работой синхронных подстанций.

Однако, в виду того, что устройство каждой подстанции связано с добавочными расходами, а работа их — с добавочными потерями энергии, то от устройства большого числа таких подстанций обычно отказываются и в обыкновенных условиях ограничиваются установкой одной или максимум двух подстанций. Это тем более допустимо, если на расстоянии между двумя такими подстанциями электрической энергией от линии передачи не пользуются и если в таком случае падение напряжения на этом участке не имеет практического значения.

Синхронный компенсатор по конструкции своей является синхронной машиной (генератор) и, как всякая вращающаяся электрическая машина, работает на относительно невысоком напряжении (наиболее высокое напряжение, применяемое у генераторов 3-х фазного тока, не превышает 22 т. вольт). Это обстоятельство вызывает необходимость при установке вращающегося синхронного конденсатора устанавливать также и трансформаторы. Вольт-амперная мощность такой синхронной подстанции зависит от величины компенсируемого индуктивного тока. Чем больше расстояние и чем больше передаваемая мощность, тем больше получится и мощность компенсаторной подстанции.

**Классификация электропередач.** По своему назначению электропередачи подразделяются на 3 группы: *питательные* (трансмиссионные), *распределительные* и *соединительные* (интерконнекционные). Принципиальная схема линий этих 3-х групп изображена на рис. 2.

*Питательные линии* имеют большую протяженность, когда электростанции находятся на значительном расстоянии от центра нагрузок, например при использовании водных сил. Термическая станция может быть построена либо в центре нагрузок,

либо на месте добычи топлива; в последнем случае *питательная линия электропередачи освобождает транспорт от перевозки топлива*. Для решения вопроса о том, относить ли станцию к топливу или к потребителю приходится сравнивать стоимость железнодорожного транспорта энергии, заключенной в топливе, с электронным транспортом, т.е. транспортом по линии электропередачи энергии, носителем которой является поток электронов. Задача эта гораздо сложнее, чем кажется на первый взгляд, и поэтому в мировой литературе можно встретить много разноречивых выводов из сравнения электронного и железнодорожного транспорта. Наиболее полное исследование этого вопроса составлено в Англии проф. Merchant (журнал *The Electrician*, 9/VIII, 1929), у которого заимствована диаграмма рис. 3 (см. также Е. А. Руссаковский, „Сравнение электронного и железнодорожного транспорта“, Труды I-й всеююзной топливной конференции 1930 г.). Задача не может иметь общего решения без целого ряда допущений, однако, в большинстве случаев справедливо следующее положение: *электронный транспорт выгоднее железнодорожного в случаях, когда станция пользуется низкокалорийным топливом*, т.е. когда сравнительно велик удельный расход натурального топлива в килограммах на квт-ч. Наоборот, *железнодорожный транспорт* обычно безусловно *выгоднее* электронного, когда станция пользуется *высококалорийным топливом*, и тем выгоднее, чем совершеннее станция, т.е. чем меньше удельный расход топлива в кг на квт-ч. При прочих равных условиях выгодность электронного транспорта повышается при увеличении числа часов использования станций. Для чисто пиковых паровых станций (см. *электростанции*) длинная питательная линия не может быть оправдана экономическим расчетом. Для грубых расчетов можно считать ежегодные расходы, связанные с содержанием, амортизацией и оплатой капитала на 1 км высоковольтной питательной линии (100 и более киловольт), по 11 коп. на киловатт в наших условиях. Исходя из этой цифры, мы будем

иметь стоимость передачи одного киловатт-часа электроэнергии на расстоянии 200 км: при 2.000 часах годового использования—1,1 коп., при 4.000—0,55, при 6.000—0,37 и при 8.000—0,28. Можно считать расходы на линию электропередачи, включая 6% на капитал, на амортизацию и содержание равными 15% от капитальных затрат на сооружение линии. Амортизационный срок считается обычно 30–35 лет при железных опорах, для деревянных опор амортизационный срок порядка 10 (только для опор).

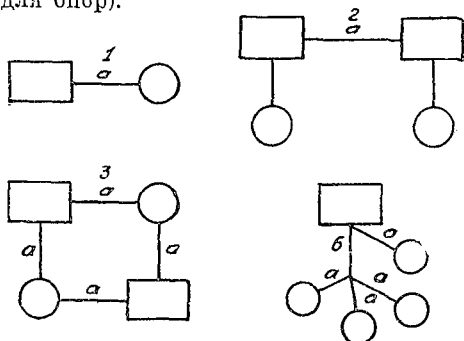


Рис. 2. Типовые схемы передачи электроэнергии. Прямоугольник обозначает электростанцию, кругок — потребителя, прямая линия — линию электропередачи. 1-а — питательная (трансмисс.) линия; 2-а — объединительная (интерконнекционная) линия; 3-а — кольцевая линия одновр. питат.; 4-а — распределит. линия; б — питательная линия.

*Распределительные* линии служат для подведения энергии к отдельным потребителям от ближайшей станции или подстанции. Стоимость их должна быть отнесена к капитальным затратам для централизованного электроснабжения данного потребителя в тех случаях, когда производится экономическое сравнение выгодности снабжения энергией от собственной электростанции или покупка со стороны. Однако, надо иметь в виду, что распределительные линии очень часто снабжают одновременно несколько потребителей, и поэтому расходы на них должны распределяться между потребителями пропорционально требуемой мощности. Для обеспечения бесперебойности в электроснабжении ответственных потребителей надо им обеспечить питание по крайней мере с 2-х сторон. Прокладка двойной линии хотя и увеличивает надежность снабжения по срав-

нению с одинарной, но не в достаточной степени, потому что такие явления, как гололед, сильные грозовые разряды и т. п., могут повредить одновременно обе линии. Наилучшим способом обеспечения по крайней мере двустороннего питания является прокладка так называемых колец высоковольтных линий электропередач, имеющих форму замкнутого многоугольника. Перерыв в одной из точек кольца не прекращает снабжения присоединенных к нему потребителей. Кольца могут

станциях, получаемой после объединения, вследствие либо уменьшения необходимого резерва, либо разновременности максимума нагрузки в соединяемых системах (напр., летний максимум Нижегородско-Ивановской системы и зимний максимум Московской), либо и то и другое вместе. В статье электрификация уже отмечалось, что сооружение английской государственной сети линий электропередач напряжением на 132 киловольта окупается за счет снижения резерва с первоначаль-

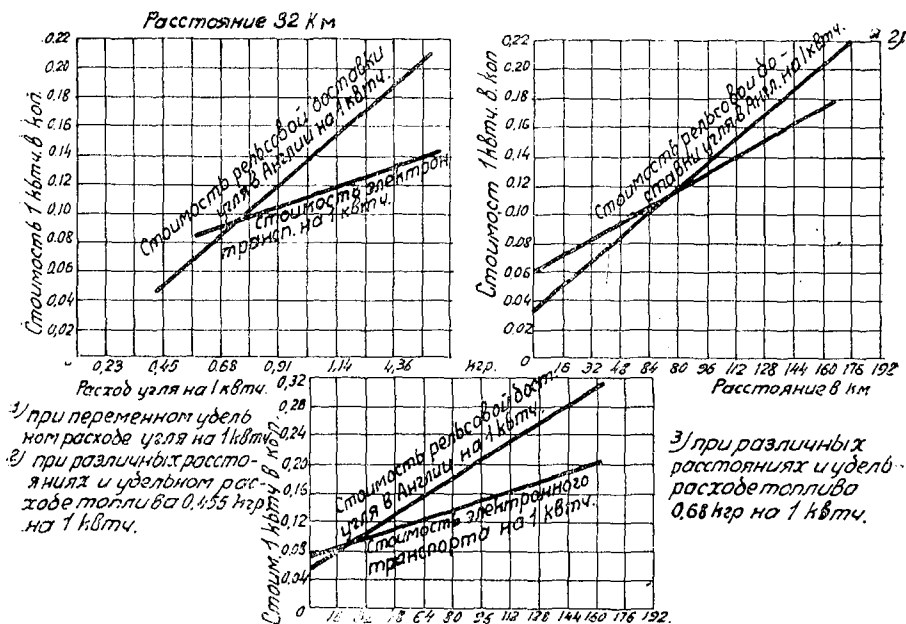


Рис. 3. Пределы выгодности применения электронного транспорта энергии. Сравнение стоимости транспорта угля и стоимости передачи 1 кВтч электроэнергии.

питаться от одной станции, чаще же от нескольких.

Соединительные линии (интерконнекционные) служат для соединения между собою отдельных станций или сетей, в частности колец. Как видно на рис. 2, соединительные линии часто являются элементами колец, и в этих случаях одновременно становятся и питательными. Соединительные линии дают целый ряд прямых и косвенных выгод объединяемым ими системам электроснабжения. В большинстве случаев стоимость их вполне окупается экономией в потребной мощности на

ных 60—70% на большом числе изолированных сравнительно мелких станций до 12% после того, как осуществится объединение системы электроснабжения Англии (см. LI, 684 сл.).

Расчеты, произведенные по Урало-Кузнецкому комбинату для различных этапов промышленного развития Урала и Кузнецк. бассейна, показали полную целесообразность устройства интерконнекционной линии передачи между электрическими сетями Кузнецкого бассейна и Южного Урала. Устройство такой линии передачи длиной порядка 1,400 км с напряжением порядка 200



киловольт оказывается существенно необходимым и экономически целесообразным уже при совмещенном максимуме нагрузки порядка 2.000 тыс. квт., так как благодаря устройству такой линии передачи оказывается возможным съэкономить свыше 300 тысяч квт. установленной мощности на электрических станциях этих районов. Эта экономия получается отчасти от смещения светового максимума, а гл. обр. в виду наличия возможности в данном случае уменьшения аварийного резерва и использования остаточных (по сравнению с нагрузкой местных районов) мощностей, распределенных по различным станциям, связываемым интерконнекционной линией передачи.

Для грубых расчетов можно принять, что соединительная линия на 100 киловольт длиной 150 км равноценна по капитальным затратам резервному агрегату в 24.000 киловатт.

*Косвенная выгода* соединительных линий иногда может быть *значительно больше, чем экономия в капитальных затратах.* Это имеет место в тех случаях, когда соединительная линия дает возможность так распределить нагрузку между двумя работавшими ранее самостоятельно станциями, что та из них, которая вырабатывает энергию значительно дешевле, будет нести основную нагрузку, а работа электростанции, дающей дорогую энергию, будет сокращена до самого крайнего минимума. Эта экономия в годовых эксплуатационных расходах, получаемая после соединения электростанций для совместной работы, может во многих случаях окупить с большим излишком капитальные затраты на линию, даже при отсутствии экономии в мощности. В частности, соединительные линии могут быть очень полезны для улучшения использования энергии гидростанций.

В городах, особенно крупных, передача высоким напряжением электрической энергии производится обычно при помощи прокладываемых под землей кабелей. Вообще передача электрической энергии при помощи кабелей имеет большое преимущество по сравнению с воздушной проводкой не только в крупных городах и в центрах,

где воздушная проводка и опасна, и крайне неудобна. Применение кабельной проводки в районах затруднено в виду ее дороговизны по сравнению с воздушной; при некоторых условиях, например в районах, подверженных гололеду, частым атмосферным перенапряжениям и проч., не говоря уже об оборонном значении, применение кабельной проводки имеет исключительный интерес. Возможное удешевление изготовления кабеля будет способствовать более широкому его распространению, тем более, что при передаче по кабелю естественная мощность \*) в 10 раз больше естественных мощностей при передаче по линиям воздушных электропередач. Ниже приводится таблица естественных мощностей для воздушной и кабельной проводки (по Рюденбергу).

Вольтам в к. в.	Воздушная линия. Естественная мощность в млн. ватт		Кабельная проводка. Естественная мощность в млн. ватт	
	однофазн.	трехфазный	однофазн.	трехфазный
	ток		ток	
30	1,2	2,4	12	24
50	3,3	6,6	33	66
100	14	27	140	270
150	30	60	300	600
200	55	110	550	1.100
300	120	240	—	—
400	210	430	—	—

С технической стороны единственным отрицательным явлением в случае кабельной проводки являются гораздо большие колебания напряжения у приемников в зависимости от передаваемой по кабелю мощности. Величина этих колебаний обусловливается статическим (емкостным) током, при чем при малых нагрузках, особенно при дальней передаче высоким напряжением, у приемников может наблюдаться недостаточно большое повышение напряжения. Как средство борьбы с этим явлением можно указать на возможность применения саморегулирую-

\*) Естественной мощностью называется такая мощность, при передаче которой вне зависимости от расстояния потери напряжения в линии передачи будут обусловлены (при cos φ приемников = 1) только омическими потерями сопротивлений, так как емкость и самоиндукция линии компенсируются.

щихся трансформаторов, которые во время работы путем автоматического включения и выключения части обмотки поддерживают во вторичной сети постоянство напряжения.

На рис. 4 показан разрез кабеля на 132 киловольт, выполненный в Италии. Повышение напряжения подземных кабелей стало очень актуальной задачей в больших городах в связи с ростом нагрузки городских сетей и практическими затруднениями к увеличению числа параллельных кабелей в подземных каналах. Увеличение вдвое напряжения дает возможность уложить в том же самом канале новый кабель с более чем двойной пропускной способностью.

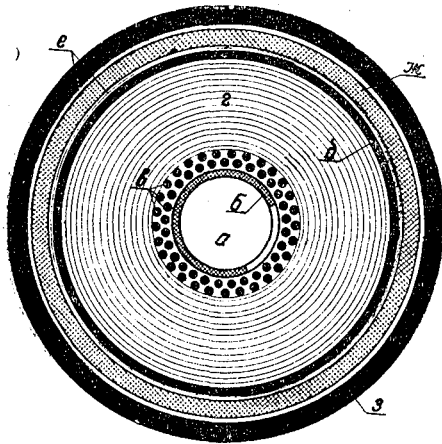


Рис. 4. Разрез однофазного кабеля на 132.000 вольт: а) канал, наполненный маслом под давлением, соединенный со специальным резервуаром; б) спираль из твердо-тянутой меди, имеющей на наружной поверхности желобок для свободного проникновения масла к изоляции; в) медные оплетенные провода, из которых скручен кабель; г) пропитанная маслом бумажная изоляция (бумага из древесной массы); д) свинцовая оболочка; е) два слоя бумаги для разделения меди и свинца; ж) броня из твердо-тянутой полосовой меди; з) наружная свинцовая оболочка.

В СССР мощная высоковольтная (35 киловольт) кольцевая кабельная сеть проложена в Ленинграде в 1926 г. Кабель был изготовлен на советских заводах. В настоящее время в Ленинграде в целях научно-исследовательской работы проложен небольшой участок масло-наполненного кабеля напряжением 110 киловольт, а завод Севкабель занят работой по изготовлению пробного кабеля напряжением уже в 200 киловольт.

*Устройство высоковольтных воздушных линий.* В статье *передача энергии на расстояние* (с.м. XXXI, прил. к стб. 487/88) на фиг. 2 показана воздушная линия на железных опорах (мачтах) американского типа. Опоры бывают двух родов: анкерные (некоторые из них угловые)—более массивные, и промежуточные—более легкие. Анкерные, как более прочные и устойчивые опоры, рассчитанные для восприятия на себя предельной нагрузки, устанавливаются обязательно в начале и конце линии, везде, где меняется направление, по обе стороны пересечения линий железнодорожного полотна, рек, горных долин, улиц, на пути линий внутри города и через 5—10 промежуточных опор. Деревянные опоры для высоковольтных электропередач широко применяются в СССР и в некоторых частях С.-А. С. Ш. Типичные конструкции таких опор для линий напряжением порядка 100 киловольт показаны на рис. 5.

Изображенная на рис. 5в деревянная опора отличается от обыкновенной тем, что каждый столб закрепляется в земле при помощи двух коротышей, при чем соединение с коротышами столбов производится при помощи двухрядной обмотки из толстой проволоки. Хотя для данных опор и требуется несколько большее количество лесного материала, но зато опоры в данном случае могут собираться из более коротких столбов. Основное преимущество этих опор заключается в том, что при обрыве провода они сдают по направлению действию силы, что может быть, конечно, учтено при расчете механической прочности опор. Кроме того, закопанные в землю коротыши после их порчи легко могут быть заменены новыми, не трогая при этом основной конструкции опоры. В первое время после революции в большинстве случаев опоры устанавливались без пропитки их креозотом. Опыт показал недолговечность таких опор. В силу этого в последнее время стали опоры пропитывать предохраняющим от гниения составом. В виду того, что наибольший эффект стойкости против гниения обнаруживает лес, пропитанный под давлением, в настоящее время приступлено к пропитыванию опор под давлением.

На железных опорах обычно подвешиваются 2 трехфазные линии, т.е. 6 проводов, на деревянных—одна трехфазная линия вертикальным или горизонтальным расположением проводов. Иногда одинарные линии имеют не 3, а 4 провода, один запасной на случай порчи одного из основных.

Материалами для проводов служат: медь, алюминий, сталеалюминий, железо, бронза. Провода делаются одножильными и многожильными (кабели).

твёрдо-тянутой меди. Во избежание перехода этой меди в мягкую отнюдь не допускается горячая пайка проводов. Железные провода применяются только в сельских местностях для линий с небольшой нагрузкой. Во избежание ржавления они обязательно делаются из оцинкованного железа. Сталь (тоже оцинкованная) применяется для проводов в случаях, когда необходим очень большой пролет (выше километра), когда обычная в этих случаях

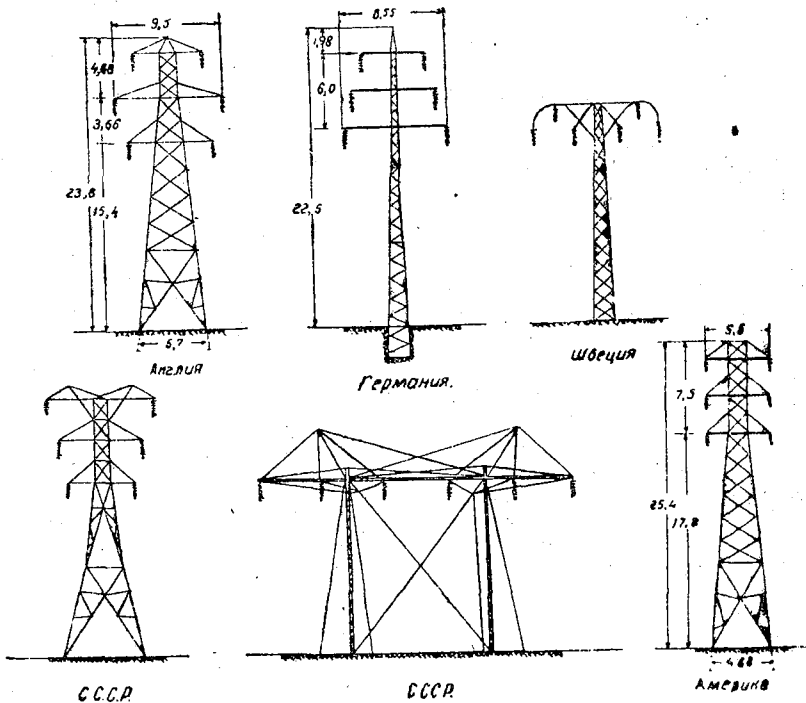


Рис. 5-а. Типы мачт для высоковольтных линий передач в различных странах мира для двух цепей (все размеры в м).

Последние состоят из нескольких скрученных проволок. Главное их преимущество перед одножильными—большая механическая прочность. Медные одножильные провода у нас допускаются для напряжений не свыше 22 кв и сечением не свыше 16 кв мм. При больших сечениях и более высоких напряжениях обязательно применяются кабели. Алюминиевые провода всегда делаются многожильными. Медные провода для высоковольтных линий обязательно делаются из полутвердой и

бронза все еще недостаточно прочна и дает слишком большой провес, удорожающий переходные опоры. В этих случаях стальной трос обычно не служит в качестве проводника, а к нему только подвешивается медный кабель, по которому и протекает ток (отметим, что в СССР для пересечения такой реки, как Ока, высоковольтной линией применены в качестве переходных опор башни Шухова). Препятствием к применению железа и стали в качестве проводов является низкая

проводимость этих металлов и большая самоиндукция линии, в особенности если она сделана из мягкого железа. Алюминий является в настоящее время главным конкурентом меди при постройке высоковольтных электропередач. Вследствие худшей проводимости сечение их должно быть в 1,64 раза больше, чем сечение медных проводов при тех же условиях. Но для очень высоких напряжений (220 кв. и выше) это явление не имеет значения,

принимаемой для проводов. Важно при монтаже беречь поверхностный слой алюминиевых проводов. В отношении влияния атмосферных условий алюминиевые провода не уступают медным, так как покрываются защитным слоем окислов. Но в местностях, где провода подвергаются действию газов химических заводов, применять алюминий не рекомендуется. В последнее время получили широкое применение (в том числе и в СССР) стале-алюминиевые

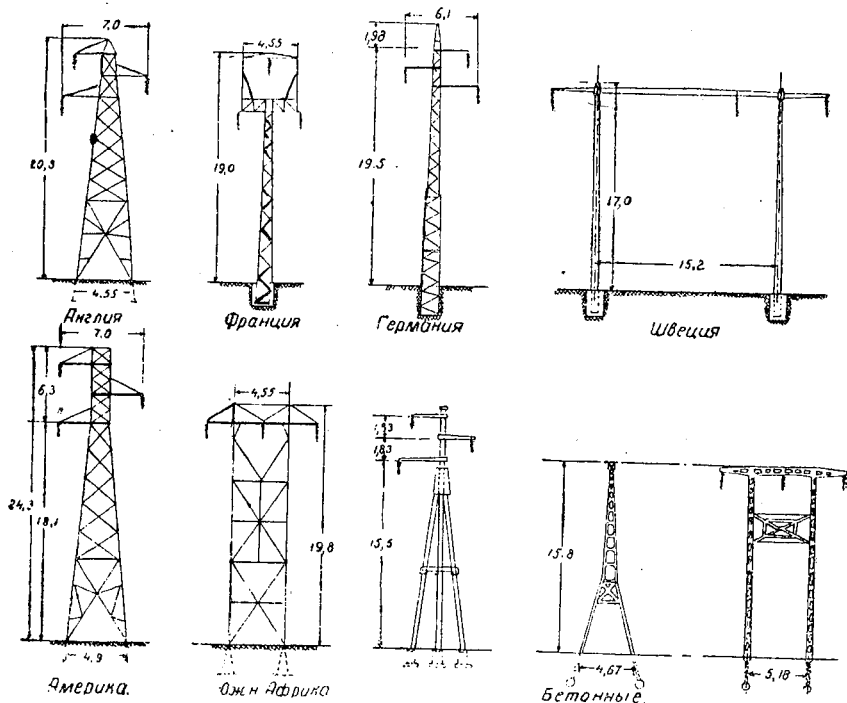


Рис. 5-6. Типы мачт для высоковольтных линий передач в различных странах мира для одной цепи (все размеры в м).

так как при этих напряжениях размер провода определяется требованием избежать явления „короны“ — потерь вследствие излучения электрических зарядов, имеющих место, когда поверхность провода по сравнению с напряжением слишком мала и поверхностная плотность электрических зарядов получается слишком высокой. В таких случаях алюминиевые провода определено дешевле медных. Недостатком алюминия является его большая мягкость по сравнению с медью, приме-

провода, соединяющие преимущества алюминиевых с прочностью стальных. Они состоят из стального сердечника, скрученного из оцинкованных проволок, и алюминиевых проволок, покрывающих сердечник обычно двумя слоями. Отношение сечения алюминиевых проводов к сечению стальных составляет обычно 5. Реже применяются стале-медные провода, в которых стальная сердцевина сваривается по способу Монното с медной оболочкой, при чем



тельно *подвесные* (см. рис 6). Несколько подвесных изоляторов соединяются в *гирлянды*. Число изоляторов в каждой гирлянде зависит от напряжения. При напряжении 100 киловольт обычно помещают 7 изоляторов на промежуточных опорах и 9 на концевых. Для 220 киловольт в Америке применяют 13 или 14 для промежуточных, 15 или 16 для концевых гирлянд, хотя опыты, произведенные в Америке, показали возможность ограничиться 11 для промежуточных и 13 для концевых. Форма, которая придается подвесным изоляторам, должна предохранять от перекрытия даже в случае сырой погоды и тумана. Запас электрической прочности у отдельных изоляторов доста-

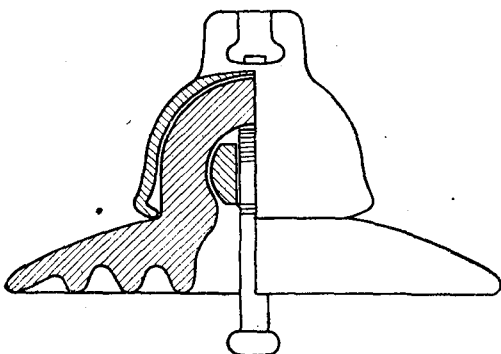


Рис. 6. Подвесной изолятор.

точно велик, но очень трудно добиться равномерного распределения напряжения вдоль гирлянды изоляторов. Линии высокого напряжения 220 киловольт, если они проходят в местностях, подверженных частым туманам, должны иметь, на основании американской практики, изоляторы увеличенной поверхности. Наибольшая опасность перекрытия изоляторов имеет место, когда они сильно запылены и застигнуты туманом. При таких условиях на американских линиях в 220 киловольт бывали случаи перекрытия изоляторов и вывода линии из строя. Поэтому изоляторы периодически очищаются от пыли.

Провода к подвесным изоляторам обычно прикрепляются наглухо. Но в последние годы в СССР стал применяться предложенный проф. Сушкиным и инж. Глазуновым способ под-

вески проводов на промежуточных опорах на „скользящих клеммах“. Это дает возможность облегчить конструкцию опоры, так как в случае обрыва провода опора будет испытывать меньшее одностороннее тяжение, чем при обычном способе подвески.

Очень серьезное значение имеет защита линий передач от грозových разрядов (см. *молния* и *эромоотвод*) и вообще атмосферных перенапряжений. Эти перенапряжения опасны не только, а может быть и не столько для линий передач, но и для трансформаторов и аппаратуры станций и подстанций. Одним из серьезных средств защиты линии от перенапряжений или, вернее, ограничения волн перенапряжений является натяжка одного или нескольких заземленных во многих точках защитных тросов. Защитные тросы располагаются обычно выше проводов и способствуют весьма значительному снижению возникающих перенапряжений. В виду того обстоятельства, что устройство таких защитных тросов значительно удорожает стоимость сооружения линии передачи, очень часто ограничиваются прокладкой троса на участках неблагоприятных в смысле атмосферных перенапряжений, а также на протяжении 1—2 км от станции и подстанции. Значение устройства заземляющих тросов можно усмотреть из приведенной далее таблицы II. В качестве защитного средства против перехода волн с крутым фронтом на шины станции и подстанции иногда устраивают на прилегающем к станции и подстанции участке электропередачи пониженную изоляцию провода, облегчающую возможность разряда на землю. Весьма надежным средством против перехода волн перенапряжения на станцию является перевод за несколько сот метров воздушной линии передачи в кабельную проводку; однако, этот способ применим пока для сравнительно невысоких напряжений. При таком способе защиты наиболее уязвимым местом является переходная муфта от воздушной линии в кабель и вообще ближайший кабель. Далее, в помещении станции и подстанций весьма часто устанавливаются специальные отражающие волну

приборы (реактивные катушки) и рядники для отвода волны перенапряжения в землю. Понятие об этих приборах дано ниже.

Таблица II.

Аварии на высоковольтных линиях электропередачи (район Великих Озер) в США.		
Аварии и перемены в работе в 1928 г.	в	%/о
Длина линий в километрах	3,330	356
Есть ли заземляющий трос	есть	нет
°/о °/о повреждений		
Перекрытие от молний	46,4	84,9
" " других причин	2,1	1,6
Заземление	2,1	1,6
Короткое замыкание	3,3	—
Механические повреждения	2,8	2,8
Не относящиеся к линии:		
Неправильное включение	4,6	—
Неправильная эксплуатация	20,0	17,1
Неизвестн. причины и разн.	17,7	12,0

За последние годы в разных странах, в особенности в США и в СССР во Всесоюзном электрот. инст., производятся серьезные научно-исследовательские работы, связанные с грозовыми разрядами. Для этой цели построены специальные лаборатории и сконструированы специальные измерительные приборы. Определяется не только напряжение, индуцированное в проводе высоковольтной линии, но и продолжительность разряда и другие его характеристики. При помощи приборов, называемых *клиненографами*, устанавливаемых на линии, производится систематическое фотографирование поля, создаваемого перенапряжением в линии. Директор наиболее мощной в мире лаборатории такого рода, принадлежащей Джeneralь Электрик Компани в Америке, Ф. В. Пик, приводит следующие характеристики молнии: напряжение порядка 100 млн. вольт, сила тока—100 тыс. ампер, продолжительность—несколько микросекунд, энергия—4 киловатт-часа (иногда много больше), мощность—порядка 1.000 млрд. лощ. сил (максимальная мгновенная). Разряд обычно не колебательный. Индуцированная волна в линии продолжается в течение нескольких микросекунд и имеет напряжение в несколько миллионов вольт (тем больше, чем выше провод от земли, поэтому в отношении грозы надежнее горизонтальное расположение проводов). На расстоянии от  $2\frac{1}{2}$  до 10 км от места возникновения грозового перенапряжения индуцированное напря-

жение уменьшается вдвое (это расстояние тем меньше, чем выше индуцированное напряжение). Индуцированный заряд может иметь различную полярность и в зависимости от этого клиденограммы имеют различный вид. Форма волны имеет большое значение для изоляции. Измерения, произведенные на Пенсильванской линии 220 кв., показали, что перекрытие гирлянды изоляторов, получающееся при одном миллионе вольт от 60-ти периодного тока при разрядах, вызванных грозой, наблюдаются только при 2 миллионах вольт и что поэтому сопротивляемость изоляторов мгновенным грозовым разрядам примерно в 2 раза больше, чем сопротивляемость при обычной форме кривой. В лаборатории Джeneralь Электрик установлен генератор искусственных грозовых разрядов, дающий 5 млн. вольт, что превышает величину наведенного напряжения высоковольтных линий, когда-либо измеренную при грозе. Пользуясь этим генератором удалось очень детально изучить явления, сопровождающие грозовые разряды. Катодным осциллятором изучались волны естественных грозовых разрядов, и потом эти волны воспроизводились искусственно и посылались по линиям электропередач. Измерялось напряжение, переключавшее изоляторы при естественном грозовом разряде, и сравнивалось с искусственным. Искусственная молния, полученная от „генератора молний“, была способна расщепить шестиметровую деревянную опору. Приблизительно в то же время во Франции в обсерватории Пик де Миди в Пиренеях производились наблюдения над грозовыми разрядами, установившие некоторую зависимость силы грозовых разрядов от геологического строения местности. К. Доцэр в докладе на Токийском мировом инженерном конгрессе в 1929 г., описывая результаты этих наблюдений, сообщает, что, например, на сплошном известняке вовсе не бывает ударов молнии, тогда как гранит и сланец очень подвержены им. Наиболее сильные разряды бывают на линии соприкосновения двух различных геологических формаций. Автор доказывает возможность по геологической карте данной местности

составит карту грозových разрядов и при помощи этой карты выбрать такую трассу для линий электропередач, чтобы опасность от грозových разрядов была уменьшена до минимума.

Перенапряжение в линии происходит не только от атмосферных влияний, но и при таких случаях, как: внезапное включение линии передачи под напряжение, при выключении работающих в холостую трансформаторов и асинхронных двигателей, при выключении большой нагрузки, при отключении работающих в холостую линий большой емкости, при замыкании на землю одной из фаз трехфазной системы.

В связи с защитой машин трансформаторов и приборов от разрушительного действия волн перенапряжений и для отвода тока в землю, как было выше сказано, применяются два основных прибора: реактивная катушка и разрядники. Простейший тип — роговой разрядник — представляет собою отогнутые в виде рогов два медных стержня с воздушным промежутком между ними. Один из них присоединен к проводу, другой заземлен; промежуток между рогами настолько велик, что он при обычных напряжениях не перекрывается; большое перенапряжение вызывает появление вольтовой дуги, при чем потоком горячего воздуха эта дуга поднимается вверх по рогам, длина ее увеличивается, и в некоторый момент она разрывается и гаснет. Расстояние между рогами составляет величину порядка 6—8 м.м при напряжении 6,6 кв., 50—90 при 33 кв. и до 330 при 66 кв. В США получили большое распространение *алюминиевые разрядники*; они имеют искровой промежуток между рогами, последовательно с которым включается сопротивление в виде электролитического конденсатора, состоящего из ряда алюминиевых тарелок, находящихся в электролите. Алюминий покрыт окисью, не проводящей ток при нормальном напряжении. При определенном повышении напряжения изолирующая способность пленки из окиси нарушается, и разрядник дает соединение с землей. Однако, при прохождении тока через электролит химическая реакция восстанавливает изолирующую пленку, вследствие чего ток прекра-

щается. Алюминиевый разрядник должен ежедневно заряжаться путем пропускания тока для поддержания изолирующей пленки, иначе последняя растворяется в электролите. Это является основным недостатком алюминиевого разрядника. Имеются и другие типы разрядников (см. Г. Л. Эпштейн, „Перенапряжение на электрических установках“, Киев, 1927). Электролитические и ему подобные разрядники для напряжения в 220 киловольт становятся настолько дорогими, что от них в США отказываются.

Для защиты трансформаторов и генераторов от крутого фронта волны перенапряжения, идущей со стороны линий передач, ставятся защитные катушки самоиндукции, шунтированные иногда безиндукционным сопротивлением в виде стержня из металла с высоким удельным сопротивлением, соединяющим зажимы катушки (катушки Кампоса). Применяются также более простые защитные катушки без такого шунта.

В последнее время вообще стали отказываться от установки специальных катушек самоиндукции, служащих отражателями волн перенапряжений, полагая, что сам трансформатор, являясь такой катушкой, должен справляться с этой задачей. В силу этого, обычно современные трансформаторы имеют значительно усиленную изоляцию первых витков, наиболее подверженных разрушительному действию волн перенапряжений. Высоковольтные линии электропередачи могут оказывать мешающее *действие на соседние линии связи* путем либо электростатической, либо электромагнитной индукции. При неблагоприятных условиях эти воздействия могут быть опасны для аппаратов связи и пользующихся ими лиц. Наиболее опасным представляется акустический удар при разряде телефонной линии через телефон в тех случаях, когда замыкается на землю один из проводов соседней линии электропередачи. Лучшим способом избежать опасных воздействий линии электропередачи на линию связи является выбор достаточного расстояния между ними, когда это возможно и экономически выгодно. Если это невозможно, необ-



димо принять меры для ослабления влияния, каковы: 1) установка разрядников перед телефонами во избежание акустического удара; 2) применение изолирующих трансформаторов; разделяющих линию на несколько частей; 3) такое соединение обмоток трансформатора, при котором избегается появление гармоник звуковой частоты; 4) транспозиция двухпроводных линий связи, т. е. перемена их взаимного расположения через каждый километр (перекрещивание, при котором правый провод становится левым, и наоборот). Иногда применяется транспозиция и проводов линии электропередачи (через несколько десятков километров).

В трехфазных линиях электропередачи *нейтральную точку* часто *заземляют*, обычно через сопротивление или катушку самоиндукции. Заземление нейтрали ограничивает величину возможных на линии перенапряжений и дает путь для отвода статических зарядов. Для напряжений свыше 20 киловольт, а в особенности для напряжений порядка 100 и 200 киловольт, в настоящее время применяются открытые *подстанции*. На подстанции устанавливаются трансформаторы, масляные выключатели (для размыкания и замыкания цепи под током), разъединители (рубильники для размыкания или включения цепи не под током и не под напряжением), разрядники, а также трансформаторы для измерительных приборов. Все эти механизмы соединяются с высоковольтными шинами, подвешенными на железных или железобетонных каркасах открытой подстанции. Если на подстанции устанавливаются синхронные конденсаторы, то они помещаются в специальном здании. Опыт показал, что самые сильные снегопады не мешают функционированию открытой подстанции. При очень большом развитии электрических сетей, в настоящее время связывающих иногда целый ряд мощных станций и снабжающих энергией крупные индустриальные районы, правильная и надежная работа линий передач и возможная защита электрических машин трансформаторов и аппаратуры от повреждений имеет в эксплуатации исключительно серьезное значение. Это

обстоятельство, с одной стороны, является причиной устройства все усовершенствующихся способов селективной защиты, а с другой стороны— устройства центров диспетчерского управления сетями и станциями. Для всякого объединения электрических станций диспетчерская служба и диспетчерское управление являются обязательными. В последнее время, в виду наличия весьма длинных и исключительно мощных линий передач энергии, приобрел громадное значение вопрос взаимной стойкости работы сетей и станций, характеризующейся так называемой „устойчивостью работы“, т. е. такой взаимной связью, при которой гарантируется невыпадение из синхронизма генераторов различных станций, связанных сетью электропередач. В случае несоблюдения условий, необходимых для устойчивой параллельной работы, электрические генераторы различных станций будут выходить из синхронизма, и работа всей электрически-связанной системы придет в расстройство, что внешне будет выражаться в сильном колебании напряжения системы и перерывах тока. Устойчивость различается статическая и динамическая. Статической устойчивостью называется такая работа электрической системы при нормальных эксплуатационных условиях, при которой имеются все факторы, обеспечивающие синхронную работу генераторов. Динамической устойчивостью называется устойчивость параллельной работы станций в периоды аварий, когда работающие параллельно станции также не должны выходить из синхронного состояния определенное, правда очень короткое, время, пока не подействует селективная защита и не выключит поврежденный участок линии. Устойчивость работы системы, которой, как уже сказано, в современных мощных сетях придается исключительное значение, в основном зависит от реактанса общей связи между станциями, длины связующей станции линии передачи, от передаваемой мощности, а также от включенной параллельно мощности станций и от ряда других факторов. Устойчивость параллельной работы аналитически характеризуется

углом сдвига между напряжениями той и другой станции, при чем величина этого угла будет различная в зависимости от условий параллельной работы. Предельный угол сдвига напряжений будет порядка  $90^\circ$  (наличие омического сопротивления способствует некоторому увеличению этого угла). До этих пределов угол между напряжениями может расходиться в период аварии до момента ее устранения. Чтобы угол в периоды аварии (к концу ее) не превзошел  $90^\circ$ , он во время нормальной работы должен быть значительно меньше  $90^\circ$  — обычно порядка  $20^\circ$ .

Передаваемая от станции к станции, соединенным линией электропередачи, мощность (напр. от Шатурской станции на 1-ую Московскую ГЭС) связана уравнением  $W = \frac{E_1 E_2 \sin \theta}{x}$ . В приведенной формуле  $E_1$  и  $E_2$  означают напряжение на той и на другой станции, а  $x$  — реактивное сопротивление между ними. Для устойчивости работы электрических станций и в периоды аварий (динамической устойчивости) имеет громадное значение быстрота действия селективной защиты в целях исключения поврежденного участка в течение того времени, пока угол  $\theta$  не дошел еще до своего допустимого предельного значения. Большое влияние на устойчивость работы имеет также величина живой силы ротора генератора, а кроме того скорость действия автоматического регулятора возбуждения, который должен поднимать падающее вследствие короткого замыкания напряжение на генераторе. Так. обр. для обеспечения динамической устойчивости параллельной работы станций приходится отказываться от прежних приемов, допускающих понижение напряжений в генераторе в периоды аварий, с целью уменьшения величины тока короткого замыкания. Современный генератор должен выдерживать ток короткого замыкания при полном возбуждении.

В виду особой важности надежной работы селективной защиты линий передач, которая должна гарантировать своевременное, исключаемое иногда долями секунды, выключение поврежденного участка, в последние годы был разработан целый ряд систем и способов

такой защиты, представляющих к настоящему времени специальную область электротехники и требующую от соприкасающихся работников серьезной подготовки. Все перечисленные условия работы современных сетей действительно требуют единого *диспетчерского управления*, которое теперь стало неотъемлемой и чрезвычайно важной составной частью общего управления. Объединенные сети, распределяющие энергию нескольких станций, имеют центральный диспетчерский пункт, откуда диспетчер по своему усмотрению в зависимости от технической целесообразности производит включение отдельных станций и линий передач; делается это, при наличии полной автоматизации, непосредственно со щита управления, при отсутствии же автоматизации или неполном ее развитии — соответственным распоряжением по прямому телефонному проводу. На диспетчерском щите управления оборудована (иногда свещающаяся) полная схема всех соединений сети и станций с соответствующими сигналами. На основании этой схемы диспетчер имеет полное и наглядное представление о характере работы системы для каждого данного момента и может найти наилучшее решение для переключения работы системы при обнаруженных авариях. Автоматическое управление на дальнее расстояние, а также полная автоматизация электрических установок за последние годы в США получили весьма большое распространение. К 1930 г. имелись данные об автоматическом управлении, устройствах дальнего наблюдения и дальнего управления, а также дальне-измерительных установках на суммарную мощность около 5,5 млн. квт, а именно:

Синхронных преобразоват. на мощн. около 1000 т. квт	
Гидро-электростанций на мощность около 700 " "	
Мотор-генераторов " " " 400 " "	
Трансформаторных установок " " " 700 " "	
Ртутных преобразователей " " " 175 " "	
Синхронных конденсаторов " " " 180 " "	
Устройств дальнего наблюдения и управления " " " 300 " "	
Автоматических управлений фидерами " " " 800 " "	
Дальне-измерит. установок " " " 400 " "	



Страна	Протяжение трассы	В однопутн. исчислен.
США . . . . .	3.413	8.490
Швейцария . . . . .	2.465	4.816
Франция . . . . .	2.292	4.495
Германия . . . . .	1.727	4.135
Италия . . . . .	2.113	3.970
Англия . . . . .	953	2.332
Швеция . . . . .	1.793	2.208
Австрия . . . . .	900	1.148
Испания . . . . .	605	1.115
Индия . . . . .	356	1.163
Япония . . . . .	475,5	1.160

В России первый трамвай в Киеве был построен в 1892 г., а первая магистральная железная дорога (участок Москва—Мытищи Северных ж. д.) была электрифицирована в 1929 г. К настоящему времени в СССР электрифицировано следующее протяжение магистральных жел. дор.:

	Протяже- ние трассы	В одно- путн. исчислении
Пригородные линии:		
Москва-Загорские Мытищи- Щелково Сев. ж. д. . . . .	90	180
Москва-Люберцы - Быково Кав. ж. д. . . . .	34	68
Москва-Обираловка и Реу- тово - Балашиха Курск. жел. дор. . . . .	35	59
Ленинград - Ораниенбаум Окт. ж. д. . . . .	40	80
Итого по пригородн. лин.	199	387
Линии с грузовым дви- жением:		
Тифлис-Хашури - Зестафо- ни Эвк ж. д. . . . .	185	185
Запорожье-Никополь Ект. ж. д. . . . .	95	95
Кизел - Чусовой Пермск. жел. дор. . . . .	113	113
Итого по груз. лин.	393	393
Всего на 1/1 1935 г. . . . .	592	780

2. Классификация Э. ж. д. Э. ж. д. делятся на: а) городские (трамвай, метрополитены), б) пригородные, в) междугородные большой скорости и г) магистральные с грузовым и пассажирским движением. Городские Э. ж. д., не имеющие собственного полотна, а проходящие по рельсам, уложенным на уровне улиц, называются трамваями; имеющие же собственное полотно под землей или на эстакаде в черте города называются метрополитенами. Оба вида имеют основное назначение обслуживать пассажирское движение в черте

города. Отличие их в скоростях движения: трамвай не допускают скоростей свыше 35—40 км/час., метрополитены имеют скорости до 60 км/час. Скорости, обычно применяемые на Э. магистральных жел. дорогах, таковы:

Т а б л и ц а 1.

Категория дорог	Средняя технич.	Наибольшая
Магистральные:		
Товарные поезда . . . . .	30—50 км/час	80 км/час
Пассажирск. " . . . . .	50—80 "	100 "
Скорые " . . . . .	70—80 "	100—120 "
Пригородные " . . . . .	40—60 "	90 "

Скорости движения на максимальном подъеме обычно равны: при товарном движении—30—40 км/час, при пассажирском движении—40—60 км/час.

3. Основные преимущества электрической тяги, кроме указанных в ст. транспорт (XLI, ч. 10, 547/49'), таковы: повышение скорости движения по сравнению с дорогами паровой тяги, особенно на городских и пригородных ж. д., имеющих частые остановки. Повышение скорости достигается за счет большего начального ускорения при трогании электрического поезда. Для пригородных дорог с остановками через 1—1,2 км коммерческая скорость электрических поездов—45—50 км/час., т.е. на 25—30% больше, чем при паровых. Следствием повышенной скорости движения при электрической тяге является увеличение пропускной способности линий. Экономия топлива, т.к. централизованное снабжение электрической энергией жел. дор. от мощных тепловых электростанций дает сбережение на топливе около 40% по сравнению с расходами высокосортного топлива на паровозах. Экономия на содержании и обслуживании подвижного состава Э. ж. д., получаемая вследствие большей скорости движения, обслуживания электровозов и моторных вагонов бригадой из двух, а иногда и одного машиниста вместо 2—3 при паровой тяге и, наконец, вследствие большего пробега вагонов и электровозов по сравнению с пробегом вагонов и паровозов при паровой тяге. В среднем экономия по содержанию составляет от 25 до 35%. При постройке новой железнодорожной линии сразу

под электрическую тягу достигается большая экономия за счет уменьшения земляных работ, т. к. электрическая тяга допускает значительно более крутые уклоны, чем паровая.

4. *Электроснабжение Э. ж. д.* Для снабжения Э. ж. д. энергией служат электростанции следующих типов: 1) центральные станции общего пользования. При больших мощностях центральных станций энергия для тяговых нужд может передаваться по линиям передачи, одновременно обслуживающим промышленную и осветительную нагрузки без заметного влияния характера ж. д. нагрузки на работу других потребителей. Этот способ питания широко применяется гл. обр. на дорогах постоянного тока (Америка, Франция, СССР) и реже на дорогах однофазного тока (Швеция). Как показывают опыты некоторых дорог, коэффициент использования мощности центральных при совмещении промышленной и тяговой нагрузок понижения не дает. Отношение пиковой нагрузки к средне-суточной на линиях с товарным движением в среднем колеблется от 2 до 2.5.

2) Специальные электрические станции (Австрия, Швейцария) или же комбинированные (Бавария), на которых имеются генераторы как для промышленной, так и для тяговой нагрузки. Эта система электроснабжения имеет место на линиях однофазного тока с частотой  $16\frac{2}{3}$  пер/сек.

Питание железнодорожных тяговых подстанций производится или по проводам линий передач общего пользования, или посредством специальных передач. Последнее — в случае питания от специальной ж.-д. централи или же от комбинированной. В обоих случаях устройство линий передач производится по общим правилам и нормам на высоковольтные установки. Сравнительно редко для подвески линий передач используются мачты контактной сети.

В качестве рабочего тока Э. ж. д. применяется как постоянный, так и переменный. Постоянный ток с напряжением в рабочей сети (прямой—обратный провод) от 500 до 1.200 в. употребляется преимущественно на городских

ж. д. (трамвай—не свыше 600 в.) и в редких случаях на пригородных и дорогах с тягой электровозами (Нью-Йорк—Нью-Хевен). Напряжение от 1.200 до 3.000 в. применяется на магистральных и пригородных линиях. Свыше 3.000 в. постоянного тока имеют только опытные линии (Италия). При напряжении в рабочей сети до 600 в. применяются моторы, работающие при полном напряжении; при напряжении в рабочей сети свыше 600 в. моторы работают нормально по 2 последовательно (на коллекторе—половинное напряжение рабочей сети).

Наиболее распространенное напряжение переменного однофазного тока Э. ж. д.—15.000 в. (Европа) и 11.000 в. (Америка). Частота однофазного тока европейских ж. д. нормально принята  $50/3 = 16\frac{2}{3}$  пер/сек. Америка применяет однофазный ток с частотой 25 пер/сек. Напряжение на коллекторе тяговых двигателей от 200 до 500 в. Наибольшее развитие дороги 3-х фазного переменного тока получили в Италии. Нормальное напряжение 3.300 в. при частоте  $15-16\frac{2}{3}$  пер/сек. Имеются опытные линии с использованием 3-х фазного тока нормальной частоты 50 пер/сек. Напряжение, подводимое к двигателю,—от 400 до 600 в.

Помимо указанных основных систем тока, при электрификации ж. д. применяются следующие системы. Система однофазно-трехфазного тока характеризуется однополюсным контактным проводом с питанием его однофазным током и с преобразованием на электровозе однофазного тока в 3-х фазный при помощи вращающегося преобразователя фаз (так наз. система расщепленной фазы). Имеется на дорогах Норфольк, Западной Пенсильванской (США) и пробных электровозах австрийских ж. д. На опытном участке около Будапешта применена система расщепленной фазы с частотой 50 пер/сек. и питанием от 3-х фазной сети по одной фазе на участок. Система однофазно-постоянного тока: в рабочем проводе—однофазный ток с преобразованием на электровозе в постоянный ток при помощи мотор-генераторов. Дорога Детройт-Толедо (Форд), Нью-Хевен (Америка).

5. Тяговые подстанции служат для преобразования электрической энергии, получаемой от центральной станции, и непосредственного питания сети контактных проводов Э. ж. д. Расстояние между подстанциями Э. ж. д. определяется в зависимости от величины напряжения рабочего тока и от допустимых падений напряжения в проводах (прямом и обратном) при заданных размерах движения. На дорогах постоянного тока с напряжением 3.000 в. расстояние между подстанциями составляет от 25 до 40 км, для 1.500 в.—

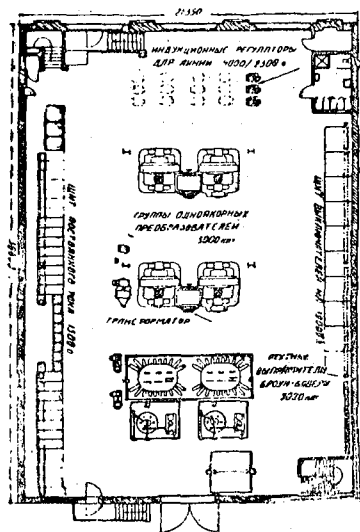


Рис. 1.

от 10 до 25 км. При однофазном токе в рабочем проводе с напряжением 15.000 в. расстояние между подстанциями достигает 80 км, в среднем составляя 50 км. Ограничение расстояний между подстанциями в некоторых случаях вызывается нормами допустимых падений напряжения в рельсовой цепи по условиям защиты подземных сооружений от электролиза (постоянный ток) и от мешающего воздействия на провода связи (переменный ток).

Преобразователи тока, устанавливаемые на тяговых подстанциях, выбираются в зависимости от рода и напряжения рабочего тока в контактной сети и способа питания подстанций. Различают три основных типа тяговых подстанций: 1) для преобразования пе-

ременного тока в постоянный, 2) для преобразования переменного тока в переменный же, но другой частоты, и 3) для понижения напряжения переменного тока без преобразования частоты.

Первый тип применяется исключительно на дорогах с постоянным током в рабочей сети. Для напряжений от 600 до 1.500 в. в качестве преобразователей тока служат: а) однокорные преобразователи, б) ртутные выпрямители и в) реже мотор-генераторы. Для напряжений постоянного тока свыше 1.500 в. преобразователями служат по преимуществу мотор генераторы и ртутные выпрямители (мотор-генераторы в случае рекуперации энергии и ртутные выпрямители—без рекуперации). Второй тип преобразователей устанавливается на дорогах переменного тока низкой частоты ( $16\frac{2}{3}$  пер/сек), питаемых от центральных станций общего пользования (50 пер/сек). Преобразователями на таких подстанциях служат: а) мотор-генераторы и б) специальные машины, так наз. преобразователи частоты. Третий тип преобразователей применяется для дорог однофазного тока с питанием подстанций от собственных централей, вырабатывающих ток той же частоты, что и в контактной сети.

Мотор-генераторы на дорогах постоянного тока состоят из моторов синхронных или асинхронных и генераторов—шунтовых или компаундных, располагаемых на одном валу с мотором. При напряжениях постоянного тока свыше 1.500 в. применяется система из двух генераторов на одном валу, соединяемых последовательно. При напряжении первичной сети до 6.000 в. моторы присоединяются к сети без трансформаторов. Коэффициент полезного действия мотор-генераторов для мощностей порядка 2.000 квт. составляет 89%. Однокорные преобразователи применяются для напряжений постоянного тока до 1.750 в., возможно применение на линиях с рекуперацией энергии. Для мощностей 1.000 квт. коэффициент полезного действия — 93,5% и для 2.000 квт. — 94%. Ртутные выпрямители применяются для всех напряжений постоянного тока на линиях без регенерации энергии, при регенерации же—совместно с мо-

тор-генераторами или одноякорными преобразователями (Франция, Америка); коэффициент полезного действия—96-97% для мощностей 1.000 квт. и выше при напряжении 3.000 в. Трансформаторы устанавливаются на подстанциях дорог однофазного тока.

Обычно от генератора центральной станции переменный ток идет к повышающему трансформатору, от него— в трехфазную линию передачи высокого напряжения, затем— через понижающий трансформатор—к мотор-генераторной группе; на стороне постоянного тока положительная шина ответвляется в контактный провод, и ток через распределительный щит идет в электровоз; возвращается ток по рельсам к отрицательной шине генератора постоянного тока. На рис. 1 приведен общий вид американской подстанции Брукдейл в плане.

6. *Контактная сеть Э. ж. д. А. Общие сведения.* На магистральных линиях с напряжением свыше 1.000 в. контактная сеть устраивается исключительно в виде воздушных контактных линий; до 1.000 в. на пригородных дорогах и чаще на метрополитенах применяется так называемый третий рельс. Воздушные контактные линии на дорогах со скоростями движения свыше 40 км/час делаются исключительно с подвеской по цепной системе, т.е. подвеской контактного провода к поддерживающему тросу помощью струн; при скоростях ниже 40 км/час—простая подвеска трамвайного типа. Тип контактной сети определяет конструкцию токоприемника. При воздушном контактном проводе съём тока осуществляется или пантографом, или реже, роликовым токосборителем; в случае 3-хфазной системы ток подводится к электровозу по двум изолированным проводам, вследствие чего и пантограф состоит из двух отдельных половин; сложность устройства контактной сети на соединениях путей является одной из причин малого распространения этой системы. Устройство 3 рельса имеет перед верхним токосниманием преимущество в смысле большей безопасности для железнодорожных агентов, а также в отношении заносимости при снегопадах.

*В. Системы цепной подвески контактного провода.*

1. Простая некомпенсированная. Контактный провод по концам анкерного участка жестко анкеруется\*). Свойства: тяжения в контактном проводе изменяются в зависимости от изменений температуры. Для регулирования тяжения в проводе применяются натяжные муфты по концам анкерного участка, регулирование по сезонам (весна, осень).

2. Простая компенсированная система. Контактный провод по концам анкерного участка закреплен на мачте подвижным образом. Конец провода может перемещаться в зависимости от изменения длины его вследствие температурных изменений. Тяжение в контактном проводе практически постоянно при всех режимах температур и равно тяжению, создаваемому весом груза на компенсаторе.

3. Цепная подвеска с поворотными консолями. Поддерживающий трос и контактный провод анкеруются на мачте подвижным образом. Натяжение в тросе и контактном проводе, регулируемое при помощи грузового компенсатора, практически постоянно при всех режимах температур. Не годится на линиях, подверженных частым и сильным гололедным образованиям, вследствие больших провесов провода в таких случаях.

4. Сложная цепная подвеска с вспомогательным тросом (компаунд) применяется в случаях больших сечений меди с целью избежать подвески на особых изоляторах.

*В. Материалы цепной подвески.*

1. Контактный провод принятого в СССР профиля имеет сечения 100 или 80 мм<sup>2</sup>. Изготавливается твердотянутым из электролитической меди или из бронзы.

2. Поддерживающий трос изготавливается из меди, бронзы или оцинкованной стали, а также из меди или бронзы с стальной сердцевинной. Тросы изготавливаются сечением 50, 70, 95 и 120 мм<sup>2</sup>.

3. Арматуру цепной подвески (струны, струновые зажимы, стыки провода

\*) Анкеровкой называется заземление провода.

и т. д.) предпочтительнее делать из нержавеющей металлов, остальные детали (подвесные хомуты, трубы для фиксаторов и т. д.) — оцинкованными. Литые части арматуры — из ковкого чугуна или стали.

Изоляция в настоящее время почти на всех линиях при всяком напряжении одиночная. Мачты предпочтительнее железные по соображениям срока

службы. Как правило, станции выделяются в самостоятельные секции сети. Станционные пути подразделяются также на секции, причем главные пути всегда независимы от парковых. Последние в свою очередь на развитых станциях подразделяются на группы.

7. *Расход энергии на Э. ж. д.* Расход энергии складывается, с одной стороны, из расхода энергии моторами на механическую работу преодоления ходового сопротивления движению, сопротивления инерции подвижного состава при трогании и расхода энергии на преодоление подъемов, а с другой стороны — из различных потерь энергии в моторах, в передаче,

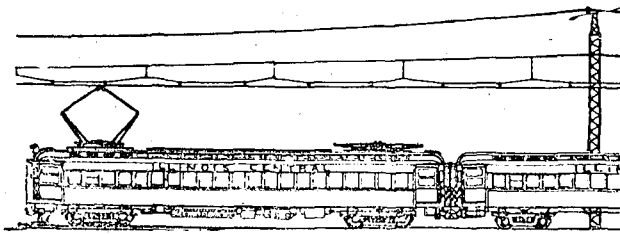


Рис. 2.

в линиях электрической передачи и из расхода энергии на собственные нужды электровоза. Расход энергии измеряется в в. ч./тн. км и относится обычно к шинам высокого напряжения подстанций. Для определения расхода энергии, включая и потери от локомотива до шин высокого напряжения подстанций, принимают коэффициенты полезного действия подстанций, рабочей сети и электровозов или моторных вагонов. С учетом всех потерь средний расход электрической энергии составляет:

в линиях электрической передачи и из расхода энергии на собственные нужды электровоза. Расход энергии измеряется в в. ч./тн. км и относится обычно к шинам высокого напряжения подстанций. Для определения расхода энергии, включая и потери от локомотива до шин высокого напряжения подстанций, принимают коэффициенты полезного действия подстанций, рабочей сети и электровозов или моторных вагонов. С учетом всех потерь средний расход электрической энергии составляет:

Г. *Схемы питания и секционирование сети.*

Для облегчения нахождения повреждений в сети при параллельной работе подстанции и параллельной работе нескольких путей контактная сеть делится по длине на отдельные участки. На границах таких участков (секций) ставятся выключатели, ручные или же автоматические,

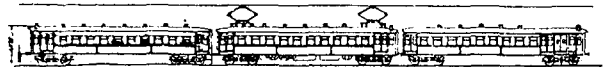


Рис. 3.

позволяющие отключить поврежденный участок сети (так наз. продольное секционирование). Для той же цели на многопутных линиях с параллельной работой нескольких путей между ними через 4-5 км устанавливаются разъединители (ручные или автоматические), дающие возможность при авариях отключить поврежденный путь (попереч-

Для городских и пригородных ж. д.

от 40 до 70 в. ч./тн. км.  
 „ магистральных дорог „ 20 до 50 „

Расход энергии на городских и пригородных ж. д. зависит от числа остановок и профиля, на магистральных — гл. обр. от характера профиля и скоростей движения. На горных участках магистралей при электрической тяге применяется так называемое „рекуперативное“ торможение, при котором



моторы работают в качестве генераторов, отдавая ток в сеть и тем самым понижая расход энергии на т. км перевозок. Рекуперация целесообразна для уклонов не ниже  $10\text{‰}$ .

8. *Защита линий слабого тока от мешающего действия тока проводов контактной сети.* Линии слабого тока, расположенные вблизи Э. ж. д., подвержены воздействию индукции от линий контактных проводов. Мешающие действия сетей рабочего тока на телефонные и телеграфные линии сказываются при всех системах тока и в большей мере при переменном. Для устранения их прибегают к прокладке линий связи в кабелях и к фильтрации рабочего тока от гармоник высшего порядка (постоянный ток). Электролиз подземных сооружений возникает под действием „блуждающих токов“ (вместе утечки из рельс) на ж. д. постоянного тока. Меры предупреждения электролиза — уменьшение падений напряжения в рельсах, хорошая изоляция рельсовой цепи (щебеночный балласт), обратные изолированные провода, присоединяемые параллельно к рельсовой цепи, и реже — дренажирование; контактный провод всегда соединяют с положительным полюсом генератора, а обратный провод (рельс) — с отрицательным полюсом; при таком соединении разъединение труб происходит только у подстанции, тогда как при ином соединении это разъединение происходило бы под каждым вагоном.

9. *Подвижной состав.* В качестве основной единицы подвижного состава при мотор-вагонной тяге обыкновенно применяется моторный вагон с одним или двумя прицепными вагонами или, реже, группа из 2 моторных и 3 прицепных вагонов. Такая группа носит название мотор-вагонной поездной единицы. Единицы могут комбинироваться по 2, по 3 или по 4 в зависимости от интенсивности дневного движения, что чрезвычайно облегчает задачу овладения пассажиропотоками во время наплыва пассажиров. С другой сто-

роны, в часы затихающего движения возможно путем посылки лишь одной единицы сохранить достаточную частоту отправок, что представляет большое удобство для пассажиров и придает гибкость графику движения.

По конструкции мотор-вагонные и прицепные вагоны мало различаются между собой. Основной характеристикой, общей для обоих типов вагонов, являются: число осей, вес, длина, число мест для сидения и для стояния. В отличие от прицепных, моторные вагоны снабжены электродвигателями, характеристикой которых служат: мощность, и скорость. Моторы обычно располагаются под полом кузова моторного вагона в целях экономии полезной площади внутри вагона, предназначенной для пассажиров. Способ передачи усилия к осям — зубчатая передача. Общий вид моторного вагона

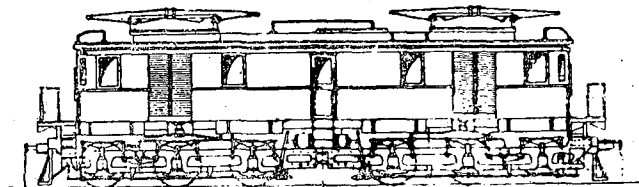


Рис. 4.

(Иллинойс — Центральной жел. дор. в США приведен на рис. 2. На рис. 3 показана трехвагонная единица Северных ж. д. Московского узла. В табл. 2 приведены основные данные по некоторым типам мотор-вагонного подвижного состава.

Типы электровозов гораздо более многочисленны, чем типы мотор-вагонного подвижного состава. О конструктивной стороне электровозов см. XL1, ч. 10, 532' сл.

В табл. 3 приведены данные о современных наиболее мощных электровозах, а также о первых электровозах СССР, работающих на перевальном участке Закавказских ж. д. Общий вид электровоза серии „С“ приведен на рис. 4.

Организация электровозного движения во многом сходна с организацией движения при паровой тяге. Различия же между ними проистекает из того,

что электровозная тяга имеет большие скорости и большие тяговые плечи, и, кроме того, электровоз является более простой машиной в эксплуатации, чем паровоз. При электрической тяге отпадает забота о водоснабжении, котельных ямах, нефтекачках, угольных складах, поворотных кругах, что упрощает работу станции и дает экономию в территории. Так же упрощается монтаж электровозов, поскольку отпадают такие цеха, как тендерный, котельный, трубный и т. д., необходимые для монтажа паровозов.

Т а б л и ц а 2.

Главнейшие данные о современном мотор-вагонном подвижном составе.

Страна	Род тока и напряж.	Состав единицы (м-моторные, п-прицепные)	Моторный вагон					Прицепной вагон		
			Число моторов	Мощн. мотора, л. с.	Вес вагона (без пасс.), т.	Число мест		Вес (без пасс.)	Число мест	
						Сидеть	Стоять		Сидеть	Стоять
Германия . . .	Пост. 800 в.	{ 2 м. 8 п.	2	280	41,0	79	137	14,5	44	68
Франция . . .	Пост. 1.500 в.	{ 1 м. 2 п.	4	235	65,1	82	61	37,7	86	68
Англия . . . .	Пост.	{ 1 м. 2 п.	4	280	56,0	84	20	28,0	100	20
"	"	{ 2 м. 3 п.	4	250	68,0	69	—	48,0	108	—
СССР . . . . .	Пост. 1.500 в.	{ 1 м. 2 п.	4	210	38,	108	54	37,0	108	54

Т а б л и ц а 3.

Главнейшие данные о современных наиболее мощных типах электровозов.

Формула осей	Род тока и напряжения	Род службы	Вес		Мощность, л. с.	Наибольшая скорость	Страна	Примечание
			Общий	Сцепн.				
1-3+3-1	О.-Т. <sup>3</sup> 11.000 в.	тов. и пасс.	218	180	4.000	128	США	1) Нуль при числе ведущих осей указывает на зубчатую передачу.
2-3 <sub>0</sub> -1+1-3 <sub>0</sub> -2 <sup>4</sup>	П. <sup>4</sup> 3.000 в.	пасс.	241,4	150	4.000	101,6	"	
1-2+2-1	О. <sup>2</sup> -15.000	тов.	90,8	72,2	2.800	65	Швейцария	2) О-однофазный ток.
1-2 <sub>0</sub> -1-1	О.-15.000	пасс.	244	—	8.800 <sup>5</sup>	100	Швейцария	3) О.-Т.—однофазно-трехфазный.
-2 <sub>0</sub> +1+1-1		тов.						
-2 <sub>0</sub> -1								
2-3 <sub>0</sub> -1	О.-Т. 15.000	пасс.	99,9	56,5	2.000	100	"	4) П-постоянный.
1-3 <sub>0</sub> -3 <sub>0</sub> -1	О.-15.000	тов.	198,8	115,8	3.560	65	Германия	5) Самый мощный в мире.
1-4 <sub>0</sub> -1	то же	пасс.	109,5	58,5	3.550	110	"	
2-3+3-2	П. Т. 1.500 в.	пасс.	158	108	5.340	180	Франция	
2-4 <sub>0</sub> -2	"	"	122	76,7	8.200	140	"	
1-2 <sub>0</sub> -2 <sub>0</sub> -0	"	тов.	76,7	76	1.720	85	"	
1-3 <sub>0</sub> +3 <sub>0</sub> -0	П. Т. 3.000 в.	пасс.	132	132	2.760	65	СССР	
1-3 <sub>0</sub> +3 <sub>0</sub> -0	"	"	114	114	—	75	"	

Литература: Пушкин, И. Д., "Электровоз на службе социалистическому транспорту" (1932); Жаппо, М., и Ферран, "Электрическая тяга в С.А.С.Ш." (1931); Забродин, В. А., "Первый электрифицированный участок на магистральных ж.д. путях" ("Гудок", М., 1932, № 7-8); Бернацкий, Л. Н., "Электрические жел. дороги" (1926); Герлаванов, Г. А., и Иванов, И. С., "Электрификация ж. д. Западной Европы" (1932); Медель, В., "Магистральные дороги постоянного тока" (1931).

А. Галанов.

Окончание цикла Электротехника см. в след. томе.





Энциклопедический  
СЛОВАРЬ

7<sup>e</sup> Издание  
Русского Библиографического  
Института „Транзит“

Пастернак



Энциклопедический  
СЛОВАРЬ

7<sup>e</sup> Издание  
Русского Библиографического  
Института „Транат“

Пастернак

