М. И. КУЗНЕЦОВ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Девятое издание, исправленное

ПОД РЕДАКЦИЕЙ Д-РА ТЕХН. НАУК С. В. СТРАХОВА

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ВЫСШАЯ ШКОЛА»
Москва 1964

ОТ ИЗДАТЕЛЬСТВА

Книга содержит основные сведения по электростатике, о постоянном токе, химических действиях постоянного тока, тепловых действиях электрического поля, электромагнетизме и электромагнитной индукции, однофазном и трехфазном переменном токе, трансформаторах, асинхронных и синхронных двигателях, машинах постоянного тока, выпрямителях, электроизмерительных приборах, аккумуляторах и электроприводе.

Даны также сведения по технике безопасности в электрических установках.

Книга может быть использована в качестве учебного пособия для учащихся профессионально-технических училищ и средних школ, а также для повышения квалификации и самообразования рабочих-электриков.

Со всеми замечаниями просим обращаться по адресу: *Москва, Ж-88, 1-я ул. Машиностроения, 5, издательство «Высшая школа».*

ВВЕДЕНИЕ

Электротехникой называют науку о применении электрической энергии для практических целей.

Электрическая энергия занимает особое место среди различных видов энергии, известных в настоящее время. Особенность электрической энергии заключается прежде всего в том, что в нее сравнительно легко преобразовать все другие виды энергии и наоборот.

При помощи достаточно простых и экономически выгодных устройств электрическую энергию очень быстро и в любом количестве можно передать на значительные расстояния и легко распределить между отдельными потребителями.

Широкое внедрение электрической энергии в промышленность, сельское хозяйство, транспорт и быт носит название электрификации.

В дореволюционной России мощность всех электростанций составляла лишь 1,1 млн. *квт*, а годовая выработка электроэнергии — 1,9 млрд. *квт · ч*. По производству электрической энергии царская Россия стояла на одном из самых последних мест, уступая даже такой маленькой стране, как Швейцария.

После Великой Октябрьской социалистической революции Коммунистическая партия поставила задачу — превратить Россию из отсталой аграрной страны в передовую индустриальную державу. Уже в первые годы Советской власти вождь нашей партии В. И. Ленин со всей остротой поставил вопрос об электрификации страны. Построение коммунизма В. И. Ленин связывал с необходимостью электрификации. Он говорил: *«Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны»*.

В 1918 г. началось строительство Шатурской районной электростанции на торфе, а в 1919 г. было начато сооружение Каширской районной электростанции на подмосковном угле.

По предложению В. И. Ленина уже в 1920 г. был принят знаменитый план электрификации России (ГОЭЛРО), в котором предусматривалось в течение 10—15 лет построить 30 электростанций общей мощностью 1,5 млн. *квт* и реконструировать

старые электростанции, увеличив их мощность на 250 тыс. *квт*. В то время В. И. Ленин писал: «...если Россия покроется густою сетью электрических станций и мощных технических оборудований, то наше коммунистическое хозяйственное строительство станет образцом для грядущей социалистической Европы и Азии».

По основным показателям план ГОЭЛРО был выполнен в 1931 г., а в 1935 г. он был перевыполнен почти в три раза.

В годы довоенных пятилеток советский народ, руководимый Коммунистической партией, продолжал вести борьбу за дальнейшее развитие и осуществление плана электрификации страны. Были построены десятки мощных тепло- и гидроэлектрических станций, проведены тысячи километров линий электропередач высокого напряжения, созданы заводы по производству электрооборудования — база отечественной энергетической промышленности. Вступили в строй Днепровская, Свирская, Угличская гидростанции, Дубровская, Штеровская, Зуевская тепловые электростанции.

В 1940 г. мощность электростанций СССР достигла 10,7 млн. *квт*, а выработка электроэнергии составила почти 50 млрд. *квт · ч*, превысив уровень 1913 г. в 25 раз. Война, затеянная гитлеровской Германией против Советского Союза, не могла остановить развитие электрификации нашей страны. В трудных военных условиях продолжалось строительство электростанций. За годы войны мощность электростанций Урала выросла более чем в два раза, Кузбасса — в 1,7 раза, Караганды — в 4,1 раза, Узбекистана — в 1,9 раза.

Электрификация Советской страны исключительно быстро развивалась в послевоенный период. Уже в 1950 г. довоенный уровень выработки электроэнергии был превзойден на 87% и составлял 90 млрд. *квт · ч*.

В годы пятой пятилетки вступили в строй мощные гидроэлектростанции, оборудованные по последнему слову техники: Цимлянская, Гюмушская, Верхне-Свирская, Мингечаурская, первые очереди Камской, Каховской, Нарвской, Княжегубской и др. В это же время пущены крупные тепловые электростанции: Мироновская, Славянская, Южно-Кузбасская, первая очередь Черепетской и ряд других. На востоке СССР пущена Усть-Каменогорская ГЭС, строятся Ангарская и Бухтарминская гидроэлектростанции.

В 1956 г. выработка электроэнергии составила 192 млрд. *квт · ч*, или в 101 раз больше, чем в 1913 г.

В результате широкого строительства электростанций Советский Союз по выработке электроэнергии занимает второе место в мире после США. Энергетика Советского Союза росла не только количественно, но и развивалась качественно. На тепловых электростанциях все более внедряются турбины и котлы с высокими температурами и давлениями пара. Были построены

крупнейшие в мире гидроагрегаты для Куйбышевской ГЭС им. XXII съезда партии единичной мощностью 105 тыс. *квт*. Ныне созданы турбины по 150, 200 и 300 тыс. *квт*. В 1960 г. мощность всех электростанций составила 66 700 тыс. *квт*.

Совершенствование энергетического оборудования дает возможность снижать удельные расходы топлива, капитальные затраты на сооружение электростанций и себестоимость электроэнергии. Электрическая энергия, вырабатываемая электростанциями, широко используется в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте и для бытовых нужд.

Для привода в движение станков, машин и различных механизмов на заводах, фабриках, в МТС и на других производствах в настоящее время преимущественно пользуются удобными и экономичными электрическими двигателями.

В электрических печах плавят металл, получают сталь и различные сплавы.

Электричество широко применяется при получении алюминия, различных химических продуктов и многих других веществ. Электрическая сварка и резка металлов имеют чрезвычайно большое распространение.

Только с развитием электротехники появилась возможность применять в промышленности новые технологические процессы, осуществлять широкую автоматизацию производства, создавать новые высокопроизводительные машины.

Электричество приводит в движение электропоезда, трамваи и троллейбусы, поднимает тяжести, помогает находить руды, уголь и нефть в недрах земли.

Внедрение электрической энергии в сельское хозяйство позволяет максимально механизировать большинство самых трудоемких работ, резко сократить сроки их выполнения и значительно увеличить выпуск сельскохозяйственной продукции.

Электрическая энергия широко применяется и в домашнем быту.

Благодаря электричеству стали возможны многие замечательные открытия нашего времени. Радиосвязь и радиолокация, проникновение в недра атома и разрушение его — все это производится при помощи электричества. Электричество позволяет нам слышать за многие тысячи километров, дает возможность видеть в полной темноте и на значительном расстоянии, открывает глазу работу внутренних органов человеческого тела и лечит болезни. Чтобы только перечислить все то, что делается при посредстве и с помощью электричества, понадобилось бы немало страниц.

С электрическими явлениями люди были знакомы очень давно, но практическое использование этих явлений началось в начале XIX в. Большое количество открытий и изобретений в области электротехники было сделано учеными и изобретателями нашей страны. Первым из них нужно назвать основополож-

ника русской науки М. В. Ломоносова. В середине XVIII в. им была создана теория атмосферного электричества. Ломоносов полагал, что существует связь между электрическими и световыми явлениями, что было более чем через 100 лет подтверждено Максвеллом.

В 1802 г. профессор физики Петербургской медико-хирургической академии В. В. Петров получил электрическую дугу и указал на возможность ее практического применения для освещения и плавки металлов. В 1832 г. русский изобретатель П. Л. Шиллинг осуществил первую в мире телеграфную связь при помощи стрелочного телеграфа, который в 1839 г. был заменен пишущим телеграфом, изобретенным русским академиком Б. С. Якоби (американец Морзе изобрел свой телеграфный аппарат в 1840 г. и применил его в 1844 г.).

Русский академик Э. Х. Ленц установил в области электромагнитной индукции закон, носящий его имя (правило Ленца). Он же тщательно исследовал вопрос о выделении энергии электрическим током и пришел к закону теплового действия тока (закон Джоуля—Ленца).

В 1834 г. Б. С. Якоби изобрел и в 1838 г. построил первый электрический двигатель. В 1836 г. Б. С. Якоби разработал процесс гальванопластики. В 1872 г. профессор Московского университета А. Г. Столетов исследовал намагничивание железа, что дало возможность производить расчеты магнитных цепей электрических машин. В 1873 г. русский изобретатель А. Н. Лодыгин создал первую лампу накаливания сначала с угольной, а потом с металлической (вольфрамовой) нитью.

В 1876 г. П. Н. Яблочков изобрел электрическую «свечу». Это изобретение получило широкое распространение в ряде стран Европы и стало известно там под названием «русского света». Яблочковым разработаны конструкции генераторов переменного тока и изобретен трансформатор. Независимо от Яблочкова трансформатор был сконструирован механиком Московского университета И. Ф. Усагиным. В 1875 г. русский инженер Ф. А. Пироцкий впервые осуществил передачу электрической энергии (6 *л. с.*) на расстояние (1 *км*), а в 1880 г. он построил и испытал первый в России трамвайный вагон с подвесным электродвигателем, питавшимся через рельсы и колеса.

Д. А. Лачинов (1842—1902), русский физик и электротехник, один из первых теоретически доказал возможность и целесообразность передачи электрической энергии на большие расстояния. В 1882 г. русский инженер Н. Н. Бенардос изобрел электрическую сварку с применением угольных электродов. В 1888 г. инженер М. О. Доливо-Добровольский изобрел систему трехфазного тока, в 1889 г. построил трехфазный трансформатор, а в 1891 г.— асинхронный электродвигатель.

В 1893 г. на Всемирной выставке в Париже Н. Г. Славянов

получил золотую медаль за способ электросварки металлическим электродом. В 1895 г. А. С. Попов изобрел радиотелеграф.

Больших достижений в области электротехники добились иностранные ученые. Среди них необходимо отметить прежде всего Фарадея и Максвелла. Майкл Фарадей (1791—1867), английский ученый, установил законы электролиза, обнаружил вращение проводника с током вокруг полюса постоянного магнита, открыл явление электромагнитной индукции.

Джемс Клерк Максвелл (1831—1879), английский физик, основоположник теории электромагнитного поля, дал уравнения электромагнитного поля, теоретически доказал существование электромагнитных волн, электромагнитную природу и давление света и работал в области кинетической теории газов.

В деле развития электротехники и ее практического применения большая роль принадлежит советским ученым: Г. М. Кржижановскому, М. А. Бонч-Бруевичу, С. И. Вавилову, А. Ф. Иоффе, М. А. Шателену, К. И. Шенферу, Е. О. Патону, А. В. Винтеру и многим другим.

В СССР за шесть пятилеток проведена огромная работа по электрификации всех отраслей народного хозяйства.

Профессия электрика очень увлекательна и интересна. Но чтобы стать передовым работником нашего социалистического хозяйства, электрик должен много и упорно учиться и непрерывно повышать уровень своих теоретических и практических знаний.

Настоящая книга рассчитана на учащихся профессионально-технических училищ, в которых электротехника является самостоятельным и специальным предметом. Кроме того, эта книга может быть учебным пособием для учащихся средней школы с производственным обучением. Знания по математике в объеме 8 классов средней школы дают возможность учащимся при пользовании книгой свободно оперировать с встречающимся в ней математическим материалом.

Несколько своеобразное расположение отдельных вопросов в данной книге объясняется тем, что преподавание физики в программе обучения учащихся электротехнических профессий не предусмотрено.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

§ 1. Молекулы и атомы

Изучая в течение ряда столетий различные вещества, из которых состоит окружающий нас мир, наука пришла к выводу, что, несмотря на разнообразие встречающихся веществ, все они слагаются из простых элементов. Было установлено, что в природе существует 102 химических элемента. Каждый элемент состоит из мельчайших частиц — атомов. Атомы различных элементов не похожи друг на друга и обладают определенными, только им присущими свойствами. Наоборот, атомы одного элемента одинаковы и сохраняют все признаки данного элемента. Атомы одного и того же химического элемента, обладающие одинаковой величиной заряда атомного ядра, но различающиеся своей массой, несколько отличающиеся друг от друга своими физическими и химическими свойствами и занимающие в таблице периодической системы элементов одно и то же место, называются *изотопами*. Сочетание однотипных атомов образует простое вещество, сочетание разнотипных атомов образует сложное вещество. Группа химически соединившихся атомов называется *молекулой*. Так, например, молекула воды состоит из трех атомов: двух атомов водорода и одного атома кислорода. Молекула серной кислоты состоит из двух атомов водорода, одного атома серы и четырех атомов кислорода. В молекулах некоторых кислот содержатся сотни атомов. В молекулу белка входят тысячи атомов водорода, углерода, кислорода, азота, фосфора и серы.

Изучая свойства отдельных элементов, знаменитый русский химик Д. И. Менделеев в 1869 г. расположил все известные в то время элементы в порядке возрастания их атомного веса, начиная с легкого водорода и кончая тяжелыми атомами свинца и висмута. При этом Д. И. Менделеев заметил, что физические и химические свойства элементов периодически повторяются. Учитывая величину атомного веса и свойства элементов, Менделеев разделил свою таблицу на 92 клетки. В момент составления таблицы в нее было внесено 64 известных элемента. Не ограничи-

ваясь размещением в своей таблице известных элементов, Д. И. Менделеев, глубоко убежденный, что им открыт один из важнейших законов природы, предположил существование в природе не открытых еще элементов и дал характеристику их основных свойств. Позднейшее открытие элементов галлия, скандия, германия и других блестяще подтвердило научное предвидение Д. И. Менделеева.

§ 2. Общие понятия об электричестве и электронной теории

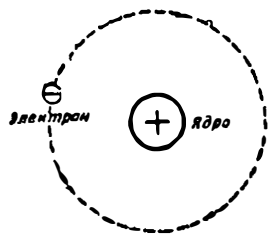
Долгое время существовало мнение о том, что атомы являются первичными, неразложимыми и неизменными частями всех тел природы, откуда и произошло название «атом», что по-гречески значит «неделимый».

В конце прошлого столетия, пропуская электрический ток высокого напряжения через трубку с сильно разреженным газом, физики заметили зеленоватое свечение стекла трубки, вызванное действием невидимых лучей. Светящееся пятно располагалось против электрода, соединенного с отрицательным полюсом источника тока (катода). Поэтому лучи получили название катодных. Под действием магнитного поля светящееся пятно смещалось в сторону. Катодные лучи вели себя так же, как проводник с током в магнитном поле. Смещение зеленоватого пятна происходило также под влиянием электрического поля, причем положительно заряженное тело притягивало катодные лучи, отрицательно заряженное тело отталкивало их. Это навело на мысль, что сами катодные лучи представляют собой поток отрицательных частиц — электронов.

В 1895 г. физик Рентген открыл особый вид лучей, не видимых простым глазом, но способных проникать сквозь многие непрозрачные тела. В настоящее время рентгеновские лучи широко используются в медицине и промышленности. В 1896 г. было обнаружено, что вещество, содержащее уран, способно в темноте действовать на фотографическую пластинку. Вскоре после этого Мария Склодовская-Кюри и ее муж Пьер Кюри обнаружили, что, подобно урану, способностью испускать невидимые лучи, проникающие через непрозрачные тела, обладает элемент торий. В 1898 г. супруги Кюри открыли два новых элемента — радий и полоний, обладающие тем же свойством, какое было обнаружено у урана и тория. Способность некоторых элементов испускать невидимые лучи была названа Кюри радиоактивностью. Исследуя радий, Кюри обнаружили, что этот серебристый мягкий металл светится в темноте, разлагает воду на кислород и водород, действует на фотографическую пластинку, непрерывно выделяет тепло. Распадаясь, радий испускает лучи трех видов: альфа-, бета- и гамма-лучи. В результате непрерывного распада радий превращается в устойчивый элемент — свинец.

Катодные лучи, лучи Рентгена, радноактивность и другие физические, химические и магнитные явления позволяют сделать вывод, что атом не является неделимой частицей вещества, а имеет сложное строение. Научные исследования показали, что атомы состоят как из электрически заряженных, так и из нейтральных частиц.

Согласно современной теории строения вещества каждый атом состоит из ядра, вокруг которого вращаются электроны.



Фиг. 1. Схема строения атома водорода

Ядро заряжено положительным электричеством, а электроны — отрицательным.

Атом обычно не проявляет никаких электрнческих свойств (нейтрален). Однако это указывает не на отсутствие в нем электричества, а только на то, что положительиого и отрицательного электричества имеется в нем поровну.

Атомы различных химических элементов отличаются друг от друга своим весом (атомный вес), величиной положительного заряда ядра и числом электронов, вращающихся вокруг ядра. Так, например, в атоме водорода — самого легкого и простого по строению элемента — вокруг ядра вращается только один электрон (фиг. 1), в атоме меди — 29 электронов, в атоме золота — 79 электронов и т. д. Числу электронов, вращающихся вокруг ядра, всегда соответствует порядковый номер элемента в периодической системе элементов Д. И. Менделеева. Например, атом 92-го элемента таблицы — урана — имеет ядро, заряженное 92 единицами положнтельного электричества, и 92 электрона, вращающихся вокруг ядра по многочнслениым орбитам.

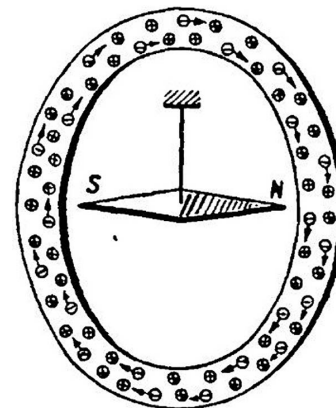
Те из вращающихся в атоме электронов, которые расположеиы на крайних орбитах, связаны с ядром слабее, чем электроны, находящиеся на ближиих к ядру орбитах. Под действием соседних атомов или вследствие других причин можно заставить крайние электроны покинуть свои орбиты.

Атомы всех металлов имеют эти неустойчивые внешние электроны, которые легко покидают свои орбиты, чем и объясияется хорошая электропроводность металлов.

Атомы ряда других веществ прочно удерживают электроны около ядра и не дают им свободно уходить из атомов. Такие вещества плохо проводят электричество.

Русскне ученые Л. И. Мандельштам и Н. Д. Папалекси еще в 1912 г. поставили интересный опыт. Было взято металлическое кольцо (фиг. 2), вблизи которого против середины помещена маленькая магнитная стрелка. Стрелка устанавливалась в направ-

лении север—юг. Кольцо под действием посторонней силы приводилось в быстрое вращение и затем резко останавливалось. В момент остановки кольца магнитная стрелка поворачивалась и располагалась вдоль оси кольца, но через некоторое время вновь принимала свое прежнее направление. Объяснить этот опыт можно так. При вращении кольца свободные электроны вместе с атомами металла приходят в движение. Резкое торможение приводит к остановке атомов металла, но свободные электроны некоторое время по инерции будут продолжать двигаться. В кольце на короткое время возникает электрический ток, который создает магнитное поле, действующее на магнитную стрелку.



Фиг. 2. Опыт Папалекси и Мандельштама

Этот опыт показывает, что в металлах имеются свободные электроны.

В обычном состоянии атомы металла, ионы (атомы, потерявшие или приобретшие электроны), а также свободные электроны находятся в беспорядочном тепловом движении. Если под действием тех или иных причин заставить свободные электроны смещаться в одном направлении, такое упорядоченное движение свободных электронов в металлических проводниках будет представлять собой электрический ток.

Как уже упоминалось, положительный и отрицательный заряды в атоме обычно равны между собой. Но если атомы тела начинают терять электроны (например, при электризации тела трением), то положительный заряд тела становится больше, и мы говорим, что тело заряжается положительно.

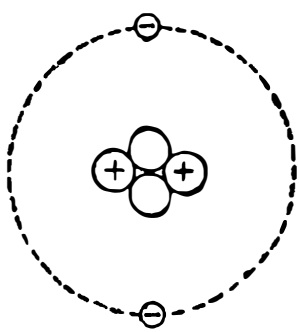
Если же тело получает электроны, то в нем наступает их избыток, и тело заряжается отрицательно. При этом нужно учитывать, что если стекло, например, при натирании его кожей теряет электроны и заряжается положительно, то кожа, получая электроны со стекла, заряжается отрицательно.

Теряя или приобретая электроны, нейтральный в электрическом отношении атом становится заряженным. Такой атом называется *ионом*. Процесс превращения нейтрального атома в ион называется *ионизацией*. В качестве примера ионизации можно указать на некоторые металлы (натрий, калий), которые при освещении их поверхности способны выделять электроны. Честь открытия этого явления принадлежит известному русскому физику А. Г. Столетову. Это явление получило название *фотоэлектрического эффекта* и используется в фотоэлементах.

Нагревая металл до высокой температуры, мы заставляем хаотически двигающиеся атомы металла двигаться еще быстрее. Электроны, которые ранее удерживались на орбитах атомов, теперь испускаются нагретым металлом в окружающее пространство. Это явление называется термоэлектронным эффектом и используется в радиолампах, выпрямителях и других устройствах.

Нейтральная молекула газа может быть ионизирована под действием высокой температуры, лучей Рентгена, ультрафиолетовых лучей, радиоактивных излучений, высокого напряжения, а также при ударе нейтральной молекулы о быстролетящий электрон (ионизация толчком). Молекулы веществ, попадая в растворитель, ослабляют внутреннюю связь и распадаются на положительные и отрицательные ионы.

Масса (вес) электрона очень мала: она в 1838 раз меньше массы ядра атома самого легкого газа — водорода. Поэтому при решении некоторых вопросов можно считать, что вес атома водорода целиком определяется весом ядра, заряженного положительным электричеством и называемого **протоном**.



Фиг. 3. Строение атома гелия

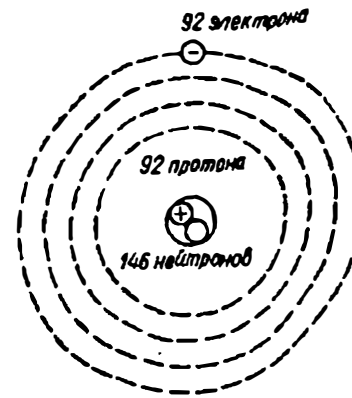
Вторым по счету после водорода в таблице Менделеева стоит элемент гелий. Согласно электронной теории атом гелия имеет два протона в ядре и два электрона, вращающихся вокруг ядра. Заряд ядра гелия в два раза больше заряда ядра водорода. Однако атомный вес гелия не 2, а 4. Если предположить, что в ядре гелия 4 протона, то количество положительного электричества будет больше количества отрицательного электричества, чего не может быть. Советский ученый профессор Д. Д. Иваненко предположил, что в состав ядра каждого атома, кроме частиц, заряженных положительно, — протонов, входят также частицы, не имеющие заряда, но масса которых равна массе протона. Эти частицы были названы **нейтронами**. Таким образом, в ядре атома гелия, кроме двух протонов, находятся два нейтрона. Строение атома гелия схематически дано на фиг. 3.

Атом железа в таблице Менделеева имеет порядковый номер 26 и атомный вес 56, следовательно, ядро атома железа состоит из 26 протонов и 56—26=30 нейтронов. Вокруг ядра

атома железа вращаются 26 электронов. На фиг. 4 схематически показано строение атома урана (порядковый номер 92, атомный вес 238).

Мы попытались упрощенно представить себе строение атома. На самом деле атом устроен несравненно сложнее.

Нами была рассмотрена разница между проводниками и изоляторами с точки зрения классической физики, которая изучает законы макроскопических тел, т. е. таких тел, в состав которых входит большое количество атомов и электронов. Различие между диэлектриками и проводниками классическая физика видит в том, что в диэлектрике все электроны прочно удерживаются около ядра атома. В проводниках же, наоборот, связь между электронами и ядром атома сильна и имеется большое количество свободных электронов, упорядоченное движение которых вызывает электрический ток. Классическая физика допускает любые значения энергии атома (в пределах некоторого интервала энергии), а изменение энергии атома считает происходящим непрерывно сколь угодно малыми порциями. Однако изучение оптических спектров элементов и явлений, связанных со взаимодействием атомов с электронами, указывает на непрерывистый характер внутренней энергии атомов. Атомная и молекулярная физика доказывает, что энергия атома не может быть любой и принимает только вполне определенные значения, характерные для каждого атома. Возможные значения внутренней энергии атома называются энергетическими или квантовыми уровнями. Уровни энергии, которыми не может обладать атом, называются запретными уровнями.

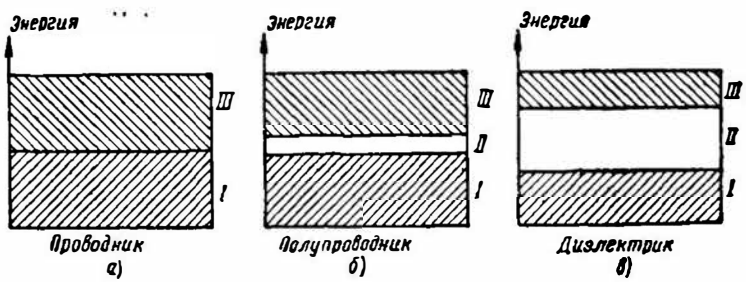


Фиг. 4. Строение атома урана. Порядковый номер — 92. Атомный вес —238. Заряд атома равен 0

Квантовая физика, изучающая микроскопические тела и законы их движения, дает иное объяснение различию между диэлектриками и проводниками. Согласно квантовой теории как в диэлектрике, так и в проводнике существуют свободные электроны. Диэлектрики и проводники различаются между собой лишь заполненностью и относительным расположением энергетических уровней электронов. Это и составляет основу зонной теории электропроводимости. Полная энергия электронов, вращающихся вокруг ядра, тем больше, чем больше радиус орбиты. Электрон может находиться в строго определенном квантовом состоянии, причем другие электроны в этом состоянии находиться не

могут. Если сообщить электрону извне определенное количество энергии, то он может перейти в новое, более высокое квантовое состояние. Сам электрон при этом и атом, в состав которого он входит, называются возбужденными. Переход электрона с высокого уровня на более низкий уровень вызовет перескок электрона на орбиту меньшего радиуса. При этом энергия, которая была затрачена на перевод электрона в возбужденное состояние, теперь будет отдана им в виде светового кванта определенной частоты или передана другому электрону. Переход электрона в иное квантовое состояние невозможен, если это квантовое состояние занято другим электроном. В твердом теле, состоящем из множества атомов, энергетические уровни отдельных атомов смещаются и, объединяясь, образуют энергетические зоны.

Различают заполненную или нормальную зону, в которой находятся электрические заряды невозбужденного атома. Другой зоной является свободная зона, или зона возбуждения, в которую могут попадать электроны возбужденного атома. Между заполненной и свободной зонами помещается запретная зона,



Фиг. 5. Расположение энергетических зон твердого тела:
I — заполненная (нормальная) зона, *II* — запретная зона (зона недозволенных уровней), *III* — свободная зона (зона возбуждения)

или зона недозволенных уровней. Ширина запретной зоны определяет электропроводимость вещества. Слово «зона» не нужно понимать как площадь или полосу определенных геометрических размеров. Когда мы говорим о какой-либо зоне, то имеем в виду количество энергии, которой обладают электроны, находящиеся в этой зоне. Энергетическую структуру тела можно изобразить графически. На фиг. 5 показано расположение энергетических зон твердого тела. У проводников (металлов) заполненная и свободная зоны перекрываются, между ними нет запретной зоны (фиг. 5, *а*), поэтому электроны легко переходят из заполненной в свободную зону и обеспечивают высокую электропроводимость металлов.

У полупроводников ширина запретной зоны мала (фиг. 5, *б*). Под действием внешних причин (тепло, свет, электрическое поле

и т. п.) электроны могут преодолеть запретную зону, перейти из заполненной в свободную зону. У изоляторов запретная зона чрезвычайно широка (фиг. 5, *в*) и переход электронов из заполненной зоны в свободную затруднен. Электропроводимость такого тела практически отсутствует.

Кроме частиц — протона, нейтрона и электрона, о которых говорилось выше, в состав атома входят еще другие частицы. За счет превращений внутри ядра атом при определенных условиях выбрасывает частицу, имеющую положительный заряд. Масса этой частицы равна массе электрона, и называется эта частица позитроном (положительным электроном). Позитроны были впервые обнаружены в космических лучах.

Как нам уже известно, в состав ядра атома входят положительные частицы — протоны и нейтральные — нейтроны. Связь этих частиц в пределах ядра осуществляется не электрическими, а ядерными силами. Чтобы объяснить происхождение ядерных сил, предположили, что должны существовать частицы более тяжелые, чем электроны, но более легкие, чем протоны. Эти частицы были найдены в космических лучах и названы мезонами. Они могут иметь положительный и отрицательный заряды.

Во время распада радиоактивного вещества выбрасываются различные частицы, в частности альфа-частицы (положительно заряженные ядра атома гелия) и бета-частицы (отрицательные электроны). Было замечено, что при бета-распаде, кроме электронов, атом выбрасывает нейтральные частицы более легкие, чем нейтрон. Эти частицы получили название нейтрино. В октябре 1955 г. ученые, работающие над расщеплением атома, открыли новую элементарную частицу, которую назвали антипротоном, или отрицательным протоном.

Таким образом, мы имеем целый ряд элементарных частиц: протоны и нейтроны, положительные и отрицательные мезоны, электроны, позитроны, нейтрино и антипротоны.

Электрические явления были известны людям очень давно. Еще древние греки 2500 лет назад, натирая янтарь сукном, заметили, что янтарь после этого приобретает способность притягивать к себе легкие тела. Силу, проявляемую натертым янтарем, греки назвали электрической силой (по-гречески янтарь называется «электрон»).

Исследование электрических явлений в России было впервые начато отцом русской науки Михаилом Васильевичем Ломоносовым (1711—1765). Им была оборудована первая в России лаборатория по изучению электрических явлений. М. В. Ломоносов и Г. В. Рихман производили исследования явлений атмосферного электричества при помощи «громовой машины» и «электрического указателя», изобретенных этими учеными. Ломоносовым был написан труд «Слово о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих», в котором он установил тождество атмосферного электричества и электричества трения. Ломоносов рассматривал электричество как особую форму движения, а не как какую-то невесомую жидкость. Он гениально предсказал возможность передачи электрической энергии на большие расстояния.

При натирании стекла, смолы, эбонита, сургуча и других тел последние приобретают способность притягивать к себе легкие тела, или, иначе говоря, электризуются. Наэлектризованное тело может передать часть своего электрического заряда другому (ненаэлектризованному) телу, если их привести в соприкосновение



М. В. Ломоносов

или соединить металлической проволокой. Если же наэлектризованное тело соединить с ненаэлектризованным телом при помощи стеклянной, фарфоровой или эбонитовой палочки, то передачи части заряда от первого тела ко второму происходить не будет. Тела, способные хорошо проводить электрические заряды, называются **электрическими проводниками**. К ним относят все металлы, уголь, растворы солей, кислот и щелочей. Тела, очень плохо проводящие электричество, называются **непроводниками, изоляторами, или диэлектриками**. К ним относятся все газообразные тела в обычном состоянии, многие жидкости и почти все твердые тела, за исключением металлов и угля. К изоляторам относятся эбонит, стекло, резина, слюда, шелк, парафин, мрамор, трансформаторное масло и др.

Было замечено, что наэлектризованные тела притягиваются одно к другому или отталкиваются одно от другого. Так, например, если два тела зарядить от стеклянной палочки, натертой

о кожу, то тела будут отталкиваться. То же самое произойдет, если оба тела зарядить от эбонитовой палочки, натертой о сукно. Если же одно тело зарядить от стеклянной палочки, а другое тело от эбонитовой, то оба тела будут притягиваться одно к другому. Таким образом удалось установить, что в результате электризации различных тел получается два рода электричества. Условно один вид электричества назвали положительным, а другой — отрицательным. Следовательно, тела, заряженные одноименным электричеством, взаимно отталкиваются, заряженные разноименным электричеством,— притягиваются.

Подводя итог сказанному выше, дадим определение электричества. *Электричеством называется свойство материи* (особая форма движения материи), *имеющее двойственную природу и выявляющееся в элементарных частицах вещества* (положительное электричество — в протонах, позитронах или мезонах, отрицательное — в электронах, антипротонах или мезонах).

§ 3. Системы единиц измерения электрических и магнитных величин

Приступая к изучению основного курса электротехники, мы встретимся с измерением различных электрических и магнитных величин. Для измерения этих величин существует несколько систем единиц, например: абсолютная электростатическая, абсолютная электромагнитная, международная практическая, абсолютная практическая и др.

В абсолютной электростатической системе СГСЭ, преимущественно применявшейся для измерения электрических величин, и в абсолютной электромагнитной системе СГСМ, преимущественно применявшейся для измерения магнитных величин, основными единицами являются: сантиметр (*см*), грамм (*г*) и секунда (*сек*).

В системе сантиметр—грамм—секунда (СГС) единица скорости равна $1\frac{см}{сек}$; единица ускорения равна $1\ \frac{см}{сек^2}$; единица силы — дина (*дн*) — равна $1\frac{см \cdot г}{сек^2}\left(1\ дн = 1\ г \cdot 1\frac{см}{сек^2}\right)$; единица работы — эрг — равна $1\frac{см^2 \cdot г}{сек^2}$ (1 *эрг* = 1 *дн* · 1 *см*).

Электрические и магнитные величины, выраженные в этих системах, неудобны для лабораторных исследований и практического пользования. Поэтому в дальнейшем была разработана так называемая международная практическая система единиц. В этой системе единица электрического сопротивления — международный ом и единица величины электрического тока — международный ампер являются основными и определяются следующим образом. Международный ом представляет собой

сопротивление при температуре 0° С ртутного столба длиной 106,3 *см*, массой 14,4521 *г*, что соответствует сечению 1 *мм*². Международный ампер определяется по химическим действиям тока: это такой не изменяющийся во времени ток, который, проходя через водный раствор азотнокислого серебра, отлагает в секунду 1,118 *мг* серебра.

По этим двум единицам определялись все остальные электрические единицы.

В настоящее время в СССР применяется абсолютная практическая рационализованиая система МКСА, пригодная для измерения электрических, магиитных и механических единиц.

Основными единицамн в этой системе являются: единица длины — метр (*м*); единица массы — килограмм (*кг*); единица времени — секунда (*сек*) и единица тока — абсолютный ампер (*а*).

В системе МКСА единица скорости $v = 1\ \frac{м}{сек}$; единица ускорения $a = 1\frac{м}{сек^2}$; единица силы — ньютон $1\ н = 1\ кг \cdot 1\frac{м}{сек^2}$ — сила, сообщающая массе тела в 1 *кг* ускорение в $1\frac{м}{сек^2}$, Единица работы — джоуль $1\ дж = 1\ н \cdot 1\ м$.

В этой системе единица тока — абсолютный ампер — определяется при помощи токовых весов по силе взаимодействия между подвижными и неподвижными катушками. Абсолютный ом есть сопротивленне, в котором при протекании через него тока в один абсолютный ампер каждую секунду выделяется энергия в 1 джоуль, или 0,239 калории тепла. Остальные электрическне единицы определяются через абсолютный ампер и ом. Система МКСА называется абсолютной, потому что три ее основные единицы (из четырех) — метр, килограмм-масса н ампер — являются кратными или дольными десяти от соответствующих единиц системы СГСМ.

В частности, абсолютный ампер равен одной десятой абсолютной электромагнитной единицы тока. Слово «абсолютный» при наименовании единиц электромагнитных величин в системе МКСА мы будем в дальнейшем опускать.

Система МКСА называется практической, потому что она используется на практике при проведении электротехнических нзмерений.

Система МКСА называется рационализованной, потому что ее применение сочетается с так называемой рационализованной записью основных законов электротехники, в результате которой коэффициент 4π исключается нз большего числа уравнений, а появляется в меньшем их числе. Например, коэффициент 4π исключается из закона полного тока и всех получаемых из него соотношений, а появляется в законе Кулона и следуемых из него соотношеннях (см. ниже).

Рассмотрим соотношения между некоторыми единицами различных систем:

$$1\ н = 1\ кг \cdot 1\ \frac{м}{сек^2} = \frac{1000\ г \cdot 100\ см}{1\ сек} = 10^5\ дн$$

или

$$1\ н = \frac{10^5}{981\,000}\ кГ = 0{,}102\ кГ \text{ (веса)}.$$

$$1\ дж = 1\ н \cdot 1\ м = 10^5\ дн \cdot 100\ см = 10^7\ эрг.$$

Так как $1\ кГм = \frac{1000}{427}\ кал$ тепла, то

$$1\ дж = 1\ н \cdot 1\ м = 0{,}102\ кГ \cdot 1\ м = 0{,}102 \cdot \frac{1000}{427} = 0{,}239\ кал \text{ тепла.}$$

При дальнейшем изложении материала нами будет использована абсолютная практическая рационализованная система МКСА. Предполагается, что системы СГСЭ и СГСМ известны учащимся из курса физики.

§ 4. Закон Кулона

Два наэлектризованных тела действуют одно на другое с силой, пропорциональной величине заряда или количеству электричества на этих телах и обратно пропорциональной квадрату расстояния между телами, если собственные размеры этих тел малы по сравнению с расстоянием между ними. Эта зависимость силы взаимодействия от величины зарядов и расстояния между ними была установлена опытным путем физиком Кулоном. Позднейшие исследования показали, что сила взаимодействия между зарядами зависит также от среды, в которой находятся заряды.

Опыты привели Кулона к установлению следующего закона: два физически точечных заряда q_1 и q_2, находясь в однородной среде с относительной электрической проницаемостью ε на расстоянии r, действуют один на другой с силой F, пропорциональной произведению этих зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними. Физически точечными заряды называются в том случае, если собственные размеры их малы по сравнению с расстоянием между ними. В абсолютной практической рационализованной системе МКСА формула Кулона записывается в следующем виде:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon \cdot \varepsilon_0 r^2},$$

где ε_0 — электрическая проницаемость пустоты; в системе МКСА

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}\ \frac{\text{фарада}}{\text{метр}}.$$

ε — относительная электрическая проницаемость. Она показывает, во сколько раз при прочих равных условиях сила взаимодействия двух зарядов в какой-либо среде меньше, чем в пустоте. Относительная электрическая проницаемость — безразмерная величина.

Количество электричества или электрический заряд в системе МКСА измеряется в кулонах ($к$). 1 кулон равен $3 \cdot 10^9$ абс. ед. заряда (СГСЭ). Размерность электрической проницаемости пустоты $\frac{ф}{м}$ может быть получена из формулы Кулона:

$$[\varepsilon_0] = \left[\frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon F r^2}\right] = \frac{к \cdot к}{н \cdot м^2};$$

так как $н = \frac{дж}{м}$, а $дж = в \cdot к$, то имеем:

$$[\varepsilon_0] = \frac{к \cdot к \cdot м}{в \cdot к \cdot м^2} = \frac{к}{в \cdot м}.$$

Как будет показано дальше, $\frac{к}{в}$ есть фарада ($ф$) — единица емкости. Поэтому окончательно:

$$[\varepsilon_0] = \frac{ф}{м}.$$

Сила взаимодействия между зарядами, находящимися не в пустоте, а в какой-нибудь иной среде, уменьшается в ε раз. Приведем значения относительной электрической проницаемости для некоторых материалов, применяемых в электротехнике.

Бензин	2,3
Бумага, пропитанная парафином	3,2
Бумага, пропитанная маслом	3
Вода дистиллированная	81
Воздух	1,0006
Керосин	2
Мрамор	8,4
Парафин	2—2,4
Резина . .	2,6—3,5
Слюда	6—8
Стекло	5—10
Трансформаторное масло	2,2
Эбонит	3,1

Пример. Определить силу взаимодействия между двумя зарядами, находящимися в пустоте на расстоянии один от другого 5 *см*. Величина зарядов равна $2 \cdot 10^{-8}$ *к* и $3 \cdot 10^{-5}$ *к*,

$$F = \frac{q_1 q_3}{4\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot r^2} = \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot 4\pi \cdot 9 \cdot 10^9}{4\pi \cdot 1 \cdot 0{,}05^2} = 2{,}16 \text{ н},$$

так как 1 $н = 102$ *Г*, то $F = 2{,}16 \cdot 102 = 220$ *Г*.

Те же заряды, помещенные на том же расстоянии в керосин, будут взаимодействовать между собой с силой:

$$F = \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^{-5} \cdot 4\pi \cdot 9 \cdot 10^{9}}{4\pi \cdot 2 \cdot 0{,}05^2} = 1{,}08\ н = 110\ Г,$$

т. е. сила уменьшилась в два раза.

§ 5. Электрическое поле

Электромагнитное поле наука характеризует как особую форму материи (иначе говоря, как некоторую физическую реальность), которой присущ ряд свойств: электромагнитное поле непрерывно распределяется в пространстве, в пустоте распространяется со скоростью света (300 000 км/сек) и обладает способностью силового воздействия на заряженные частицы и токи, в процессе которого энергия поля преобразуется в другие виды энергии (тепловую, механическую и т. д.). Заряженная частица обладает электромагнитным полем, однако само поле может существовать и отдельно от частицы. Примером этому служит частица (квант) света — фотон и электромагнитное поле, излучаемое антенной.

Пусть мы имеем заряженное неподвижное проводящее тело. Электрически элементарные отрицательные заряды, входящие в состав атомов и молекул вещества тела и образующие полный заряд тела, находятся внутри его в непрерывном движении. Но даже на очень малом расстоянии от поверхности тела магнитные поля отдельных положительных и отрицательных частиц заряда взаимно компенсируются и поэтому результирующее магнитное поле вокруг заряженного неподвижного проводящего тела практически отсутствует. Наоборот, около неподвижного постоянного магнита обнаруживается только лишь магнитное поле, а электрическое поле отсутствует. Это дает нам возможность раздельно изучать электрическое и магнитное поле.

Отметим, что теория электромагнитного поля была впервые изложена английским ученым Максвеллом в его труде «Трактат об электричестве и магнетизме», вышедшем в 1873 г.

Переходя к изучению электрического поля, мы будем считать его одной из двух сторон электромагнитного поля, возбуждаемого электрическими зарядами и изменением магнитного поля и характеризуемого силовым воздействием на частицы, обладающие электрическим зарядом.

Оценка интенсивности электрического поля производится по механическим силам, с которыми поле действует на заряженные тела. Так как по закону Кулона сила взаимодействия между зарядами в данной среде зависит от величины зарядов и расстояния между ними, то за количественную меру поля принимают механическую силу, с которой поле в данной точке пространства действует на единичный положительный заряд, помещенный в

эту точку. Эта величина называется напряжениостью электрического поля и обозначается буквой E.

Согласно определению напряженность поля равна:

$$E = \frac{F}{q}.$$

Приравнивая единице один из зарядов в формуле Кулона, мы получим выражение для напряженности поля E в точке, удаленной на расстояние r от физнчески точечного заряда:

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2},$$

а для пустоты, у которой относительиая электрическая проницаемость равна единнце.

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

Размерность напряженности электрического поля можно вывести из определяющей ее формулы:

$$[E] = \left[\frac{F}{q}\right] = \frac{н}{к} = \frac{дж}{м \cdot к} = \frac{к \cdot в}{м \cdot к} = \frac{в}{м},$$

т. е. в абсолютной практической системе единиц напряженность электрического поля изменяется в вольтах на метр.

Электрическое поле, напряженность которого в разных точках пространства одинакова по величине и по направлению, называется однородным полем.

Общее число электрическнх силовых линий, проходящих через какую-либо поверхность, помещенную в электрическом поле, называется потоком вектора напряженности сквозь эту поверхность и обозначается буквой N. Сквозь поверхность S, помещенную перпендикулярно вектору напряженности, в однородном электрическом поле напряженностью E будет проходить поток вектора напряженности N:

$$N = ES.$$

Размерность потока вектора напряженности

$$[N] = [ES] = \frac{в}{м} \cdot м^2 = в \cdot м.$$

Если поверхность расположена под углом α к вектору напряженностн, то поток вектора напряженности

$$N = ES\cos\alpha = E_n S.$$

В неоднородном поле поток вектора напряженности, проходящнй сквозь поверхность, определяется так. Разбивают всю поверхность на малые площадки ΔS, считая, что каждый элемент

площадки находится в равномерном поле. Тогда поток вектора напряженности, проходящий через всю поверхность, будет:

$$N = \Sigma E_n \Delta S.$$

Поместим заряд q в центре сферы радиуса R. Напряженность поля на поверхности сферы:

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R^2}$$

Поток вектора напряженности, проходящий через всю поверхность сферы,

$$N = \Sigma E_n \Delta S.$$

Силовые линии, расходящиеся от заряда радиально, будут во всех точках перпендикулярны поверхности сферы. Учитывая, что площадь поверхности сферы $S = 4\pi R^2$, имеем:

$$N = \Sigma E_n \Delta S = E \Sigma \Delta S = E 4\pi R^2.$$

Подставив в формулу значение E, получим:

$$N = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R^2} \cdot 4\pi R^2 = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}.$$

Полученное выражение носит название теоремы Гаусса.

Необходимо отметить, что замкнутая поверхность, внутри которой помещен электрический заряд, может быть произвольной формы. Таким образом, выражение потока вектора напряженности, выведенное нами для поверхности сферы, можно применять для всякой другой замкнутой поверхности.

При изучении различных физических явлений нам приходится встречаться со скалярными и векторными величинами.

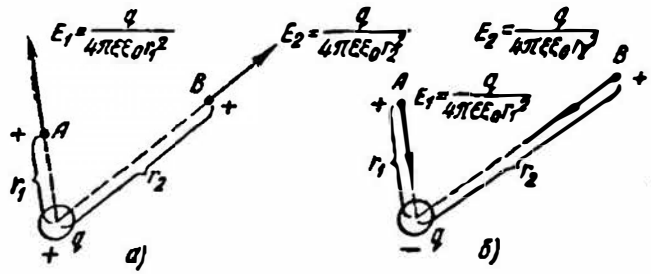
Скалярная величина характеризуется только численным значением. Приписать ей какое-либо направление нельзя. Скалярными величинами являются температура, количество вещества, энергия, мощность и т. п.

Векторная величина характеризуется как численным значением, так и направлением. Она изображается на чертеже отрезком, длина которого в определенном масштабе выражает числовое значение, а стрелка показывает направление.

К векторным величинам относятся сила, скорость движения, ускорение и т. п. Напряженность электрического поля является также векторной величиной.

На фиг. 6, *а* графически показана напряженность электрического поля в точках A и B, удаленных на расстояние r_1 и r_2 от положительного заряда q, помещенного в какой-либо среде. Как видно из чертежа, напряженность поля достаточно малого (точечного) положительного заряда направлена от заряда вдоль радиу-

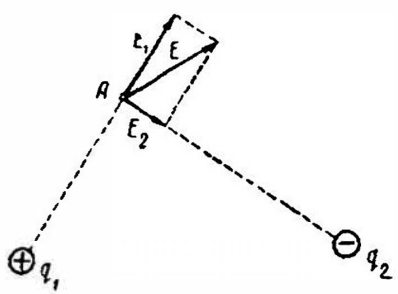
са. Напряженность поля в точках A и B, разноудаленных от заряда q, различна и изменяется по мере удаления от заряда обратно пропорционально квадрату расстояния. На фиг. 6, *б* графически показана напряженность электрического поля в точках



Фиг. 6. Напряженность электрического поля в разных точках пространства

A и B, удаленных на расстоянии r_1 и r_2 от одиночного отрицательного заряда q, находящегося в какой-либо среде. Напряженность поля в этом случае направлена вдоль радиуса к заряду.

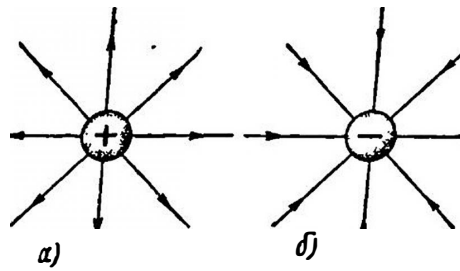
Рассмотрим теперь, чему равна напряженность поля, созданного двумя электрическими зарядами $+q_1$ и $-q_2$, в некоторой точке A (*фиг. 7*). Если убрать заряд $-q_2$, то напряженность поля в точке A, созданная зарядом $+q_1$, будет E_1. Наоборот, если убрать заряд $+q_1$, то напряженность поля в точке A, созданная зарядом $-q_2$, будет E_2. Так как напряженности E_1 и E_2 направлены под углом одна к другой, то для получения результирующей напряженности поля E от совместного действия зарядов $+q_1$ и $-q_2$ необходимо напряженности E_1 и E_2 сложить по правилу параллелограмма. Тем же способом можно вычислить и построить напряженность в любой точке поля при любом числе электрических зарядов.



Фиг. 7. Определение напряженности двух точечных зарядов

Положительный электрический заряд, внесенный в поле положительно заряженного тела шарообразной формы, удаленного от других зарядов, будет отталкиваться по прямой линии, являющейся продолжением радиуса заряженного тела. Помещая электрический заряд в различные точки поля заряженного шара и отмечая траектории движения заряда под действием его электрических сил, мы получим ряд радиальных прямых, расходящих-

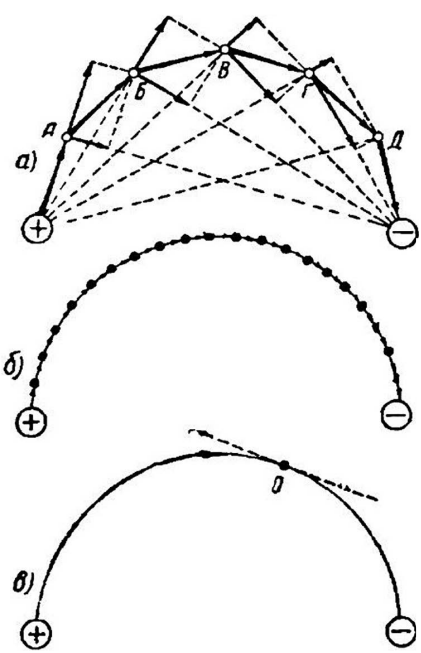
ся от шара во все стороны. Эти воображаемые линии, по которым стремится двигаться положительный, лишенный инерции заряд, внесенный в электрическое поле, называется **электрическими силовыми линиями**. Совершенно ясно, что в электрическом поле можно провести любое число силовых линий. С помощью силовых линий можно графически изобразить не только



Фиг. 8. Силовые линии заряженного шара

направленне, но и величину напряженности электрического поля в данной точке. Если условиться проводнть силовые лнннн так, чтобы через квадратный сантиметр поверхности, перпендикулярной к этим линиям в данной точке поля, проходило такое их количество, которое было бы равно напряженности поля в этой точке, то этот графический прием позволит нам судить о величине напряженности в данной точке поля по густоте силовых линий. На фнг. 8, *а* дано электрическое поле положнтельно заряженного шара, удаленного от других зарядов, а на фиг. 8, *б* дано поле отрицательно заряженного шара.

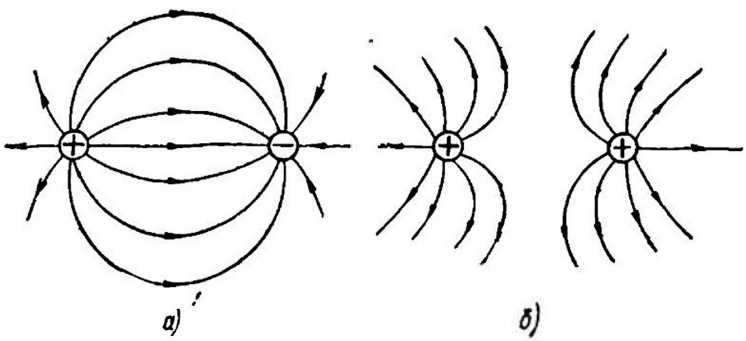
Рассмотрим более сложное электрическое поле между двумя разнонменно заряженными фнзически точечными зарядами (фиг. 9, *а*). Возьмем точку *А* и построим для нее вектор напряженности с учетом одновременного действия двух заряженных тел. На конце вектора напряженности E_1



Фиг. 9. Направление поля в различных точках пространства

ставим точку *Б* и строим вектор напряжения в этой точке. В точке *В*, установленной на конце вектора напряженности E_2, строим вектор напряженности и т. д. Ломаная линия *АБВГД* показывает направление электрического поля в точках *А*, *Б*, *В*, *Г* и *Д*. При большем числе точек (фиг. 9, *б*) ломаная линия, соединяющая эти точки, будет точнее передавать направление поля.

Точное представление о направлении поля даст линия с бесконечно большим числом точек на ней. При этом ломаная линия переходит в некоторую плавную кривую (фиг. 9, *в*). Направле-



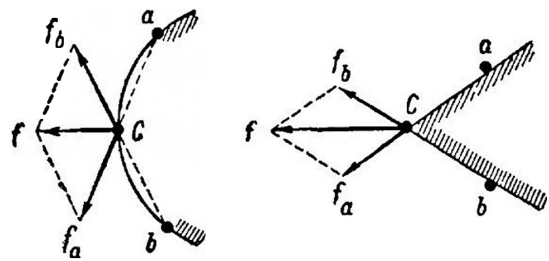
Фиг. 10. Электрические поля двух равных разноименных и одноименных зарядов

ние поля в данной точке совпадает с направлением напряженности в этой точке и может быть указано направлением касательной к силовой линии в этой же точке. На фиг. 10, *а* дано изображение электрического поля двух физически точечных разноименных зарядов, а на фиг. 10, *б* — двух одноименных зарядов.

Электрическое поле, в разных точках которого векторы напряженности одинаковы и параллельны, называется о д н о р о д н ы м. Однородное электрическое поле изображается параллельными линиями, расположенными на одинаковых расстояниях одна от другой.

Так как одноименные заряды взаимно отталкиваются, то на всяком проводнике электрический заряд сосредоточивается только на его внешней поверхности. Количество электричества, приходящееся на единицу поверхности заряженного тела, называется п о в е р х н о с т н о й п л о т н о с т ь ю электрического заряда. Величина плотности электрического заряда зависит от количества электричества на теле, а также от формы поверхности проводника. На телах правильной формы (шар, очень длинные проводники круглого сечения) электрический заряд распределяется равномерно. Поэтому поверхностная плотность электрического заряда во всех точках поверхности таких тел будет одинакова.

На проводниках неправильной формы заряд распределяется неравномерно. Бóльшая плотность электричества будет на выступах, выпуклостях, меньшая — во впадинах, углублениях. Особенно велика плотность электричества на остриях. Объяснение этого явления дано на фиг. 11, слева — для тела правильной формы (шара), справа — для тела неправильной формы. Части заряда a и b действуют на часть заряда C. Силы взаимодействия между частями заряда f_a и f_b, геометрически складываясь, дают равнодействующую силу f, причем при одинаковых си-



Фиг. 11. Взаимодействие между частями заряда

лах f_a и f_b для обоих примеров сила f будет больше во втором случае, так как угол между направлениями сил f_a и f_b меньше. Поэтому части заряда, находящиеся на острие тела неправильной формы, будут испытывать силы отталкивания, стремящиеся удалить эти части заряда с поверхности тела. Бóльшая часть заряда, скопившаяся на острие проводника, может образовать в этом месте сильное электрическое поле, под влиянием которого воздух (или другой изолятор) будет ионизирован и станет проводящим. В этом случае электрический заряд, как говорят, начинает стекать с острия. Во избежание этого в электротехнике высоких напряжений на проводниках тщательно устраняют острые углы, концы, выступы.

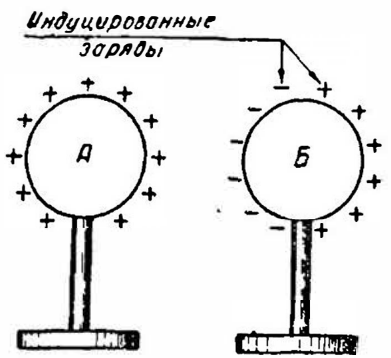
В абсолютной практической системе единиц МКСА поверхностная плотность заряда измеряется в кулонах на один квадратный метр.

§ 6. Проводник в электрическом поле

Если незаряженный изолированный проводник внести в электрическое поле, то в результате действия электрических сил поля в проводнике происходит разделение электрических зарядов. На фиг. 12 показан положительно заряженный металлический шар A, в поле которого внесен проводник $Б$. Свободные электроны проводника придут в движение в направлении, противоположном направлению электрического поля. В результате на

конце проводника, обращенном к заряженному шару, окажется избыток электронов, обусловливающий отрицательный заряд этого конца, а на другом конце проводника окажется недостаток электронов, обусловливающий положительный заряд этой части проводника.

Разделение зарядов на проводнике под влиянием заряженного тела называется электризацией через влияние или электростатической индукцией, а заряды на проводнике — индуцированными зарядами. По мере приближения проводника *Б* к заряженному шару *А* количество индуцированных зарядов на проводнике увеличивается. Электрическое поле заряженного шара *А* изменяется, как только в нем окажется проводник *Б*. Электрические силовые линии шара *А*, расходившиеся ранее равномерно и радиально, теперь изогнутся в сторону проводника. Так как началами и концами электрических силовых линий являются электрические заряды, лежащие на поверхности проводников, то, начинаясь у поверхности с положительными зарядами, силовая линия кончается у поверхности с отрицательными зарядами. Внутри проводника электрическое поле существовать не может. В противном случае между отдельными точками проводника существовала бы разность потенциалов, в проводнике происходило бы движение зарядов (ток проводимости) до тех пор, пока вследствие перераспределения зарядов потенциалы всех точек проводника не стали бы равными.



Фиг. 12. Электростатическая индукция

Этим пользуются, когда хотят оградить проводник от влияния внешних электрических полей. Для этого проводник окружают другим проводником, выполненным в виде сплошной металлической поверхности или проволочной сетки с мелкими отверстиями. Индуцированные заряды, образовавшиеся на проводнике в результате влияния на него заряженного поля, можно отделить один от другого, если разломить проводник пополам.

Проводник, попав в электрическое поле заряженного металлического тела, в свою очередь оказывает влияние на распределение частиц заряда на этом теле, заставляя бо́льшую часть заряда наэлектризованного тела скапливаться на стороне, обращенной к проводнику.

Если проводник вынести из электрического поля, то индуцированные заряды на нем пропадают и проводник снова становится незаряженным.

§ 7. Диэлектрик в электрическом поле

Как было указано выше, диэлектрик отличается от проводника отсутствием свободных электронов (точнее — относительно малым количеством свободных электронов). Электроны атомов диэлектрика прочно связаны с ядром атома.

Диэлектрик, внесенный в электрическое поле, так же как и проводник, электризуется через влияние. Однако между электризацией проводника и диэлектрика имеется существенная разница. Если в проводнике под влиянием сил электрического поля свободные электроны передвигаются по всему объему проводника, то в диэлектрике свободного перемещения электрических зарядов произойти не может. Но в пределах одной молекулы диэлектрика возникает смещение положительного заряда вдоль направления электрического поля и отрицательного заряда в обратном направлении. В результате влияния заряженного тела на поверхности диэлектрика возникнут электрические заряды. Это явление называется *поляризацией диэлектрика*.

Различают диэлектрики двух классов. У диэлектриков первого класса молекула в нейтральном состоянии имеет положительный и отрицательный заряды, настолько близко расположенные один к другому, что действие их взаимно компенсируется. Под влиянием электрического поля положительные и отрицательные заряды в пределах молекулы несколько смещаются один относительно другого, образуя *диполь*.

У диэлектриков второго класса молекулы и в отсутствие электрического поля образуют диполи. Такие диэлектрики называются *полярными*. К ним относятся вода, аммиак, эфир, ацетон и т. д. У таких диэлектриков при отсутствии электрического поля диполи в пространстве расположены хаотически и вследствие этого результирующее электрическое поле вокруг полярного диэлектрика равно нулю. Под действием внешнего электрического поля молекулы (а стало быть и диполи) стремятся повернуться так, чтобы их оси совпали с направлением внешнего поля.

В отличие от индуцированных зарядов на проводнике поляризационные заряды диэлектрика нельзя отделить один от другого. С устранением электрического поля поляризация диэлектрика исчезает. Таким образом, поляризация представляет собой упругое смещение электрических зарядов в веществе диэлектрика. При некоторой определенной величине напряженности электрического поля смещение зарядов достигает предельной величины, после чего происходит разрушение — пробой диэлектрика, в результате которого диэлектрик теряет свои изолирующие свойства и становится токопроводящим. Необходимость правильного выбора величины напряженности электрического поля в диэлектрике привела к созданию теории электрической прочности, имеющей важное значение для современной техники высоких напряжений.

§ 8. Потенциал и разность потенциалов

Пусть мы имеем бесконечное равномерное электрическое поле. В точке M помещен заряд $+Q$. Предоставленный самому себе заряд $+Q$ под действием электрических сил поля будет перемещаться в направлении поля на бесконечно большое расстояние. На это перемещение заряда будет затрачена энергия электрического поля. Потенциалом данной точки поля называется работа, которую затрачивает электрическое поле, когда оно перемещает положительную единицу заряда из данной точки поля в бесконечно удаленную точку. Чтобы переместить заряд $+Q$ из бесконечно удаленной точки снова в точку M, внешние силы должны произвести работу A, идущую на преодоление электрических сил поля. Тогда для потенциала φ точки M получим:

$$\varphi = \frac{A}{q} = \frac{1 \text{ джоуль}}{1 \text{ кулон}} = 1 \text{ вольт},$$

так как 1 джоуль $= 10^7$ *эрг*, а 1 кулон $= 3 \cdot 10^9$ абс. ед. заряда,

$$\text{то } \varphi_{\text{практ}} = \frac{10^7}{3 \cdot 10^9} = \frac{1}{300} \text{ абс. ед. потенциала.}$$

Таким образом, абсолютная электростатическая единица потенциала больше практической единицы — вольта в триста раз.

Если заряд, равный 1 кулону, из бесконечно удаленной точки перемещается в точку поля, потенциал которой равен 1 вольту, то при этом совершается работа в 1 джоуль. Если же в точку поля с потенциалом 10 *в* из бесконечно удаленной точки перемещается 15 кулонов электричества, то совершается работа $10 \cdot 15 = 150$ джоулей.

Математически эта зависимость выражается формулой:

$$A = q\varphi \text{ джоулей.}$$

Чтобы переместить из точки A с потенциалом 20 *в* в точку B с потенциалом 15 *в* 10 кулонов электричества, поле должно совершить работу:

$$A = 10 \cdot (20 - 15) = 50 \text{ джоулей}$$

или

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ джоулей.}$$

Изучая электрическое поле, отметим, что в этом поле разность потенциалов двух точек поля называется также *напряжением* между ними, измеряется в вольтах и обозначается буквой U.

Работу сил электрического поля можно записать и так:

$$A = qU.$$

Для того чтобы заряд q переместить вдоль линий поля из одной точки однородного поля в другую, находящуюся на расстоянии l, нужно проделать работу:

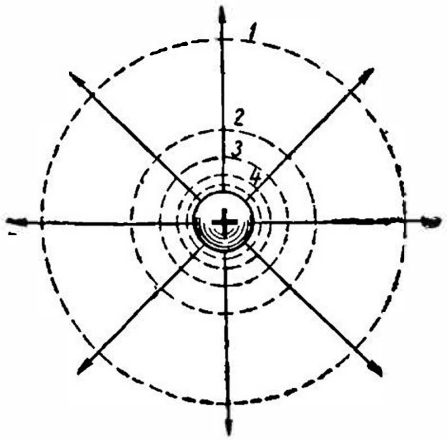
$$A = Fl = Eql;$$

так как $A = qU$, то $U = El$,

откуда $$E = \frac{U}{l}.$$

Такова простейшая зависимость между напряженностью электрического поля и электрическим напряжением для однородного поля.

Расположение точек с равным потенциалом вокруг поверхности заряженного проводника зависит от формы этой поверхности. Если взять, например, заряженный металлический шар, то точки с равным потенциалом в электрическом поле, созданном шаром, будут лежать на сферической поверхности, окружающей заряженный шар. Поверхность равного потенциала, или, как ее еще называют, эквипотенциальная поверхность, служит удобным графическим способом для изображения поля. На фиг. 13 представлена картина эквипотенциальных поверхностей положительно заряженного шара.



Фиг. 13. Эквипотенциальные поверхности (пунктир) и силовые линии (сплошные) заряженного шара, удаленного от других предметов

Для наглядного представления о том, как изменяется разность потенциалов в данном поле, эквипотенциальные поверхности следует чертить так, чтобы разность потенциалов между точками, лежащими на двух соседних поверхностях, была одна и та же, например равная 1 *в*. Первоначальную, нулевую, эквипотенциальную поверхность очертим произвольным радиусом. Остальные поверхности *1, 2, 3, 4* чертим так, чтобы разность потенциалов между точками, лежащими на данной поверхности и на соседних поверхностях, составляла 1 *в*. Согласно определению эквипотенциальной поверхности разность потенциалов между отдельными точками, лежащими на одной и той же поверхности, равна нулю; поэтому заряд перемещается по эквипотенциальной поверхности без затраты работы.

Из этой фигуры видно, что по мере приближения к заряжен-

ному телу эквипотенциальные поверхности располагаются теснее друг к другу, так как потенциал точек поля увеличивается, а разность потенциалов между соседними поверхностями, согласно принятому условию, остается одной и той же. И, наоборот, по мере удаления от заряженного тела эквипотенциальные поверхности располагаются реже. Электрические силовые линии перпендикулярны к эквипотенциальной поверхности в любой точке, так как только при условии перпендикулярности силы и перемещения работа электрических сил при движении заряда по эквипотенциальной поверхности может быть равной нулю. Сама поверхность заряженного проводника представляет собой эквипотенциальную поверхность, т. е. все точки поверхности проводника имеют одинаковый потенциал. Тот же потенциал имеют все точки внутри проводника.

Если взять два проводника с различными потенциалами и соединить их металлической проволокой, то, так как между концами проволоки имеется разность потенциалов или напряжение, вдоль проволоки будет действовать электрическое поле. Свободные электроны проволоки под действием поля придут в движение в направлении возрастания потенциала, т. е. по проволоке начнет проходить электрический ток. Движение электронов будет продолжаться до тех пор, пока потенциалы проводников не станут равными, а разность потенциалов между ними не станет равной нулю.

Если два сосуда с различными уровнями воды соединить снизу трубкой, то по трубке потечет вода. Движение воды будет продолжаться до тех пор, пока уровни воды в сосудах не установятся на одной высоте, а разность уровней не станет равной нулю.

Так как всякий заряженный проводник, соединенный с землей, теряет практически весь свой заряд, то потенциал земли условно принимается равным нулю.

§ 9. Электрическая емкость

Сообщение электрического заряда проводнику называется электризацией. Чем больший заряд принял проводник, тем больше его электризация, или, иначе говоря, тем выше его электрический потенциал.

Между количеством электричества и потенциалом данного уединенного проводника существует линейная зависимость: отношение заряда проводника к его потенциалу есть величина постоянная:

$$\frac{q}{\varphi} = C.$$

Для какого-либо другого проводника отношение заряда к потенциалу есть также величина постоянная, но отличная от этого отношения для первого проводника.

Одной из причин, влияющих на эту разницу, являются размеры самого проводника. Один и тот же заряд, сообщенный различным проводникам, может создать различные потенциалы. Чтобы повысить потенциал какого-либо проводника на одну единицу потенциала, необходим определенный заряд.

Свойство проводящих тел накапливать и удерживать электрический заряд, измеряемое отношением заряда уединенного проводника к его потенциалу, называется электрической емкостью, или просто емкостью, и обозначается буквой C.

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Приведенная формула позволяет установить единицу емкости.

$$\text{Единица емкости} = \frac{\text{единица заряда}}{\text{единица потенциала}}$$

Практически заряд измеряется в кулонах, потенциал в вольтах, а емкость в фарадах:

$$1 \text{ фарада} = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ вольт}}.$$

Емкостью в 1 фараду обладает проводник, которому сообщают заряд в 1 кулон и при этом потенциал проводника увеличивается на 1 вольт.

Единица емкости — фарада (обозначается *ф* или F) очень велика. Поэтому чаще пользуются более мелкими единицами — микрофарадой (*мкф* или μF), составляющей миллионную часть фарады:

$$1 \text{ мкф} = 10^{-6} \text{ ф},$$

и пикофарадой (*пф*), составляющей миллионную часть микрофарады:

$$1 \text{ пф} = 10^{-6} \text{ мкф} = 10^{-12} \text{ ф}.$$

Найдем выражение практической единицы — фарады в абсолютных единицах:

$$\frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ вольт}} = \frac{3 \cdot 10^9}{1/300} = 9 \cdot 10^{11} \text{ абс. ед. емкости (сантиметров)}.$$

Устройство, предназначенное для накопления электрических зарядов, называется электрическим конденсатором. Конденсатор состоит из двух металлических пластин (обкладок), разделенных между собой слоем диэлектрика. Чтобы зарядить конденсатор, нужно его обкладки соединить с полюсами электрической машины. Разноименные заряды, скопившиеся на обкладках конденсатора, связаны между собой электрическим полем. Близко расположенные пластины конденсатора, влияя одна на

другую, позволяют получить на обкладках большой электрический заряд при относительно невысокой разности потенциалов между обкладками. Емкость конденсатора есть отношение заряда конденсатора к разности потенциалов между его обкладками:

$$C = \frac{Q}{U} \text{ или } Q = CU.$$

Как показывают измерения, емкость конденсатора увеличится, если увеличить поверхность обкладок или приблизить их одну к другой. На емкость конденсатора оказывает влияние также материал диэлектрика. Чем больше электрическая проницаемость диэлектрика, тем больше емкость конденсатора по сравнению с емкостью такого же конденсатора, диэлектриком в котором служит пустота (воздух). Выбирая диэлектрик для конденсатора, нужно стремиться к тому, чтобы диэлектрик обладал большой электрической прочностью (хорошими изолирующими качествами). Плохой диэлектрик приводит к пробою его и разряду конденсатора. Несовершенный диэлектрик повлечет за собой утечку тока через него и постепенный разряд конденсатора.

Длинные линии передачи высокого напряжения можно рассматривать как своеобразные обкладки конденсатора. Емкость провода нужно рассматривать не только относительно другого провода, но также относительно земли, стен помещений и окружающих предметов. Значительной емкостью обладают подводные и подземные кабели ввиду близкого расположения токоведущих жил между собой.

Конденсаторы, емкость которых изменять нельзя, называются конденсаторами постоянной емкости.

Наиболее распространенные в настоящее время конденсаторы постоянной емкости состоят из очень тонких металлических (станиолевых) листов с парафинированной бумажной или слюдяной прослойкой между ними.



Фиг. 14. Схема устройства конденсатора постоянной емкости

Для увеличения емкости (увеличения площади пластин конденсатора) чаще всего берут по нескольку станиолевых листов и соединяют их в две группы, входящие одна в другую и разделенные диэлектриком, как схематически показано на фиг. 14. Иногда также берут две длинные станиолевые пластины, прокладывают между ними и снаружи парафинированную бумагу и затем свертывают все в компактный пакет или в трубку. Конденсаторы большой емкости во многих случаях помещают в металлическую коробку и заливают парафином.

Определим емкость плоского конденсатора. Возьмем произ-

вольную замкнутую поверхность вокруг одной из пластин конденсатора. Тогда по теореме Гаусса поток вектора напряженности, проходящий через любую замкнутую поверхность, внутри которой находится электрический заряд, равен:

$$N = ES = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}. \qquad (а)$$

Предполагая, что поле конденсатора однородно (пренебрегая искажением поля у краев пластин), получаем:

$$E = \frac{U}{d}, \qquad (б)$$

где d — расстояние между пластинами или толщина диэлектрика. Подставив значение E из формулы (б) в формулу (а), получим:

$$\frac{U}{d} S = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0},$$

откуда

$$q = U \frac{S\varepsilon\varepsilon_0}{d}.$$

Так как

$$C = \frac{q}{U},$$

то выражение емкости плоского конденсатора примет вид:

$$C = S \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{d},$$

где S — площадь пластин в $м^2$;

d — толщина диэлектрика в $м$;

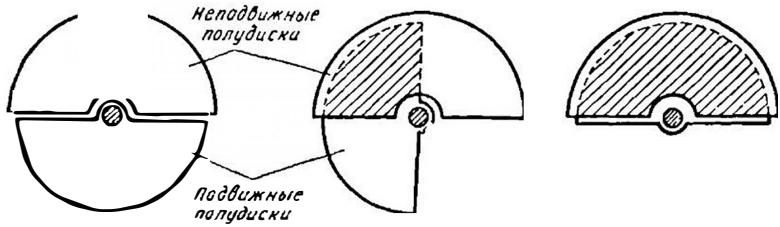
ε — относительная электрическая проницаемость диэлектрика (диэлектрическая проницаемость).

Таким образом, для увеличения емкости плоского конденсатора нужно увеличить площадь его пластин (обкладок) S, уменьшить расстояние между ними d и в качестве диэлектрика поставить материал с большой относительной электрической проницаемостью (ε).

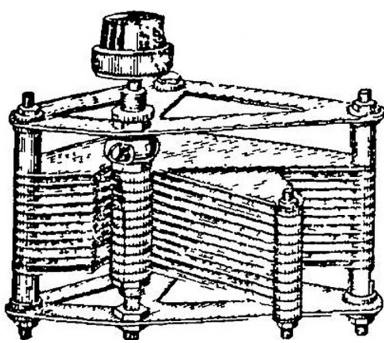
Конденсаторы, емкость которых можно менять, называются конденсаторами переменной емкости. Наиболее простой конденсатор переменной емкости имеет несколько (реже один) медных или алюминиевых полудисков, соединенных между собой электрически и укрепленных неподвижно. Другой ряд таких же полудисков собран на общей оси. При повороте этой оси каждый из укрепленных на ней полудисков входит между двумя неподвижными полудисками. Поворачивая ось и меняя таким образом взаимное расположение подвижных и неподвижных полудисков, мы можем менять емкость конденсато-

ра. На фиг. 15, *а* показана схема устройства и на фиг. 15, *б* — общий вид воздушного конденсатора переменной емкости.

В радиотехнике применяются также электролитические конденсаторы. Эти конденсаторы изготовляются двух типов: жидкостные и сухие. В обоих типах конденсаторов употребляется оксидированный алюминий. Путем специальной электрохимической обработки на поверхности алюминия получают тонкий (по-



а)



б)

Фиг. 15. Конденсатор переменной емкости:
а — схема устройства, *б* общий вид

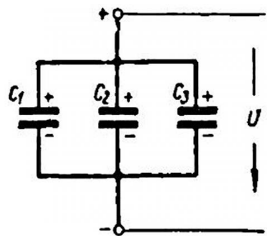
рядка нескольких десятков микрон) слой окисла алюминия Al_2O_3, представляющий так называемую оксидную изоляцию алюминия. Оксидная изоляция обладает электроизолирующими свойствами, механически прочная, нагревостойка, но гигроскопична.

В жидкостных электролитических конденсаторах алюминиевую оксидированную пластину помещают внутрь металлического корпуса, который служит второй пластиной. В корпус заливают электролит, состоящий из раствора борной кислоты с некоторыми примесями.

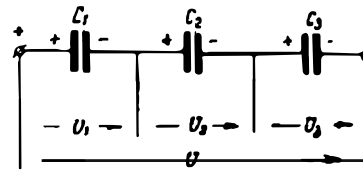
Сухие электролитические конденсаторы изготовляют путем сворачивания трех лент. Одна лента представляет собой алюминиевую оксидированную фольгу (тонко раскатанный лист металла). Другой пластиной является лента из алюминиевой фольги. Между двумя металлическими лентами помещается бумажная или марлевая лента, пропитанная вязким электро-

литом. Плотно свернутые ленты помещаются в алюминиевый корпус и заливаются битумом. Тонкий оксидный изолирующий слой с высокой электрической проницаемостью ($\varepsilon = 9$) позволяет получить дешевые конденсаторы с большой удельной емкостью.

Когда емкость одного конденсатора мала, то соединяют несколько конденсаторов параллельно (фиг. 16).



Фиг. 16 Параллельное соединение конденсаторов



Фиг. 17. Последовательное соединение конденсаторов

При параллельном соединении конденсаторов напряжение на обкладках каждого конденсатора одно и то же. Поэтому можно написать:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U.$$

Количество электричества (заряд) каждого конденсатора:

$$q_1 = C_1U;\ q_2 = C_2U;\ q_3 = C_3U.$$

Общий заряд батареи конденсаторов:

$$q = q_1 + q_2 + q_3;$$

$$q = C_1U + C_2U + C_3U = U(C_1 + C_2 + C_3).$$

Обозначая емкость батареи конденсаторов через C, получаем:

$$q = CU,$$

тогда

$$CU = U(C_1 + C_2 + C_3)$$

или окончательно

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

Следовательно, при параллельном соединении конденсаторов общая емкость равна сумме емкостей отдельных конденсаторов. При параллельном соединении каждый конденсатор окажется включенным на полное напряжение сети.

Рассмотрим последовательное соединение конденсаторов (фиг. 17).

Если левая обкладка первого конденсатора заряжена положительно (+), то вследствие электростатической индукции правая обкладка этого конденсатора получит отрицательный заряд (—), перешедший с левой обкладки второго конденсатора, которая сама зарядится положительно, и т. д. Значит, при последовательном соединении каждый конденсатор независимо от величины его емкости получит один и тот же заряд, т. е.

$$q_1 = q_2 = q_3 = q.$$

Напряжение, приложенное ко всей батарее конденсаторов, равно сумме напряжений на обкладках каждого конденсатора:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Так как

$$U_1 = \frac{q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{q}{C_2}, \quad U_3 = \frac{q}{C_3},$$

для всей батареи

$$U = \frac{q}{C}.$$

Теперь можно написать

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}$$

или, сокращая на q, получим окончательно:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

Таким образом, при последовательном соединении конденсаторов обратная величина общей емкости равна сумме обратных величин емкостей отдельных конденсаторов. Каждый из конденсаторов включен на меньшее напряжение, чем напряжение сети.

Конденсаторы широко применяются в радиотехнике, рентгенотехнике, высокочастотной промышленной электротехнике, для увеличения коэффициента мощности электроустановок и т. д.

§ 10. Диэлектрики

На практике необходима изоляция токоведущих частей электрических установок от заземленных частей, а также между собой. Это нужно для того, чтобы направить ток по пути, предусмотренному электрической схемой установки.

В технике применяют твердые, жидкие и газообразные диэлектрики. Твердыми диэлектриками являются фарфор, слюда, резина, стекло и др. В качестве жидких диэлектриков приме-

няют трансформаторное, кабельное и конденсаторное масло, синтетические жидкости — совол и совтол. Наиболее часто в качестве газообразного диэлектрика применяется воздух.

Молекула диэлектрика состоит из положительных и отрицательных ионов, а также электронов. Свободных электронов в диэлектрике очень мало.

На практике диэлектрик не является абсолютным изолятором. В обычном состоянии элементарные заряды молекулы диэлектрика находятся в хаотическом тепловом колебательном движении около центров равновесия. Если включить диэлектрик в цепь постоянного напряжения (конденсатор), то под действием сил электрического поля элементарные заряды молекул диэлектрика переместятся в направлении действующих на них сил. В результате смещения зарядов внутри диэлектрика в цепи возникает кратковременный ток, называемый *током поляризации*. Спустя очень короткое время (10^{-13}—10^{-15} сек.) ток поляризации прекращается.

Ознакомимся еще с одним током, который может протекать сквозь диэлектрик длительное время. В реальном диэлектрике всегда имеются ионы и свободные электроны. Как ни мало их количество, но с ними необходимо считаться. Под действием электрического поля ионы и свободные электроны начнут перемещаться внутри диэлектрика, образуя *ток утечки*. Величина тока утечки в ряде случаев значительно больше величины тока поляризации. Проходя сквозь диэлектрик, ток утечки, по закону Джоуля — Ленца, выделяет тепло, что необходимо учитывать при технических расчетах. Если включить диэлектрик в цепь переменного напряжения, то процесс поляризации будет проходить периодически то в одном, то в другом направлении и в цепи возникнет переменный ток. Непрерывно повторяющийся процесс потребует затраты энергии. Периодическое перемещение в материале диэлектрика ионов и свободных электронов вызовет ток утечки.

Важнейшими характеристиками диэлектрика являются: 1) удельное сопротивление; 2) электрическая проницаемость; 3) угол диэлектрических потерь; 4) электрическая прочность.

§ 11. Удельное сопротивление

Выше мы убедились, что технический диэлектрик не является абсолютным изолятором. Поэтому во время работы диэлектрик пропускает ток. Величина этого тока очень мала по сравнению с рабочими токами, протекающими по токоведущим частям электрической установки (провода, шины, кабели). Ток имеет два пути для своего прохождения: сквозь толщу диэлектрика и по его поверхности (фиг. 18). Общий ток — ток утечки I_y равен сумме токов: тока, проходящего сквозь толщу (по-

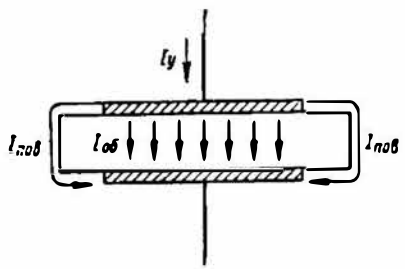
объему) диэлектрика — $I_{об}$, и тока, проходящего по поверхности диэлектрика — $I_{пов}$,

$$I_у = I_{об} + I_{пов}.$$

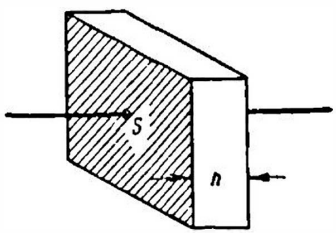
Проходя двумя путями, ток преодолевает объемное сопротивление $r_{об}$ и поверхностное сопротивление $r_{пов}$. Полное сопротивление изоляции $r_{из}$ определится:

$$r_{из} = \frac{U}{I_у}, \quad \text{где } r_{из} = \frac{r_{об} r_{пов}}{r_{об} + r_{пов}}.$$

Сопротивление единицы объема называется удельным объемным сопротивлением и обозначается ρ_U.



Фиг. 18. Ток утечки диэлектрика



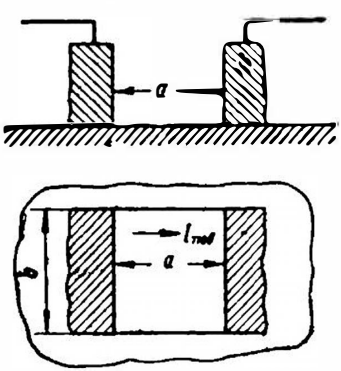
Фиг. 19. Объемное сопротивление диэлектрика

За единицу объемного сопротивления принимают сопротивление вырезанного из данного материала кубика с ребром 1 *см*, если ток проходит через две его противоположные грани (фиг. 19). Объемное сопротивление измеряется в омсантиметрах (*ом · см*) и определяется по формуле

$$r_{об} = \rho_U \frac{h}{S},$$

где h — толщина диэлектрика в *см*²;

S — площадь боковой грани в *см*².



Фиг. 20. Поверхностное сопротивление диэлектрика

Сопротивление единицы поверхности диэлектрика называется удельным поверхностным сопротивлением, обозначается ρ_S и измеряется в омах.

За единицу поверхностного сопротивления принимают сопротивление прямоугольника (любых размеров), выделенного на

поверхности материала, если ток проходит через две противоположные стороны этого прямоугольника (фиг. 20).

Поверхностное сопротивление определяется по формуле:

$$r_{пов} = \rho_s \frac{a}{b},$$

где a — расстояние между параллельно поставленными электродами;

b — ширина электродов.

Удельное сопротивление диэлектрика зависит от состояния вещества (твердое, жидкое или газообразное), состава диэлектрика, влажности и температуры окружающей среды.

§ 12. Электрическая проницаемость

Электрическая проницаемость является величиной, характеризующей емкость диэлектрика, помещенного между обкладками конденсатора. Как известно, емкость плоского конденсатора зависит от величины площади обкладок (чем больше площадь обкладок, тем больше емкость), расстояния между обкладками или толщины диэлектрика (чем толще диэлектрик, тем меньше емкость), а также от материала диэлектрика, характеристикой которого служит электрическая проницаемость.

Численно электрическая проницаемость равна отношению емкости конденсатора с каким-либо диэлектриком к емкости такого же воздушного конденсатора. Для создания компактных конденсаторов необходимо применять диэлектрики с высокой электрической проницаемостью. Электрическая проницаемость большинства диэлектриков составляет несколько единиц.

В технике получены диэлектрики с высокой и со сверхвысокой электрической проницаемостью. Основная их часть — рутил (двуокись титана).

§ 13. Угол диэлектрических потерь

В § 10 мы разбирали примеры включения диэлектрика в цепи постоянного и переменного тока. Оказалось, что в реальном диэлектрике при работе его в электрическом поле, образованном переменным напряжением, происходит выделение тепловой энергии. Мощность, поглощаемая при этом, называется *диэлектрическими потерями*. В § 88 будет доказано, что в идеальном диэлектрике емкостный ток опережает по фазе напряжение на 90°. В реальном диэлектрике емкостный ток опережает напряжение на угол, меньший 90°. На уменьшение угла оказывает влияние ток утечки, называемый иначе током проводимости. Разность между 90° и углом сдвига между напряжением и током, проходящим в цепи с реальным диэлектриком, называется *углом диэлектрических потерь* или

углом потерь и обозначается δ (дельта). Чаще определяют не сам угол δ, а тангенс этого угла — tg δ.

Установлено, что диэлектрические потери пропорциональны квадрату напряжения, частоте переменного тока, емкости конденсатора и тангенсу угла диэлектрических потерь.

Следовательно, чем больше tg δ, тем больше потери энергии в диэлектрике, тем хуже материал диэлектрика. Материалы с относительно большим tg δ (порядка 0,08—0,1 и более) являются плохими изоляторами. Материалы с относительно малым tg δ (порядка 0,0001) являются хорошими изоляторами.

§ 14. Электрическая прочность

Электрическая прочность диэлектрика является одной из основных характеристик изолирующих материалов. Напряженность электрического поля, при которой электроизолирующий материал может нормально работать, не должна превышать некоторого вполне определенного значения. При некотором значении напряженности происходит нарушение процесса работы диэлектрика, материал его пронизывается искрой, переходящей в дугу. Диэлектрик теряет при этом свои изолирующие свойства, сопротивление его резко уменьшается, и токоведущие части, разделенные ранее изолирующим промежутком, замыкаются накоротко. Наступает пробой диэлектрика. Напряжение, при котором происходит пробой, называется **пробивным напряжением** $U_{пр}$, соответствующее значение напряженности поля — **пробивной напряженностью** $E_{пр}$ или пробивной прочностью (электрической прочностью):

$$E_{пр} = \frac{U}{h}\ \frac{кв}{см} \text{ или } \frac{кв}{мм},$$

где h — толщина диэлектрика.

Совершенно ясно, что электроизоляционный материал в условиях эксплуатации не должен работать при напряжении, могущем вызвать пробой диэлектрика.

Различают два вида пробоя твердого диэлектрика: электрический и тепловой. Электрический пробой объясняется разрушением структуры вещества под действием сил электрического поля. В слабом электрическом поле электрические заряды упруго смещаются, вызывая поляризацию диэлектрика. Если же напряженность поля достигает величины пробивной напряженности, происходит срыв заряженных частиц с первоначальных положений, что приводит к пробою.

Рассмотрим явление теплового пробоя.

Как известно, при работе диэлектрика в переменном электрическом поле выделяется тепло за счет электрических потерь. При отрицательном температурном коэффициенте сопротивле-

ния нагрев материала будет сопровождаться уменьшением сопротивления диэлектрика. Это приведет к увеличению тока, проходящего сквозь диэлектрик, и к еще более сильному нагреву материала. Таким образом, процесс нагрева все время усиливается до тех пор, пока материал не нагреется настолько, что будет разрушен (расплавлен, обуглен и т. п.).

Пробой газообразных диэлектриков (воздуха) вызван образованием и движением ионов в газообразной среде при высоких значениях напряженности электрического поля. В некоторый момент быстрое движение ионов приводит их к столкновению с нейтральными молекулами газа и образованию новых ионов. Это явление сопровождается резким увеличением числа ионов в газе, вследствие чего сопротивление газа уменьшается (ударная ионизация). Наступает пробой газообразного диэлектрика.

В однородном электрическом поле (между двумя остриями, острием и плоскостью, проводами высоковольтных линий и т. п.), в местах, где напряженность поля достигает критических значений, возникает тихий разряд, сопровождающийся жужжанием или потрескиванием с образованием фиолетового свечения (явление короны). С увеличением напряжения тихий разряд может перейти в искровой, затем в кистевой и, наконец, в дуговой разряд (если мощность источника напряжения велика). Пробой воздуха у поверхности твердого диэлектрика называется поверхностным разрядом (перекрытием). Для увеличения поверхности изоляционных деталей ее делают волнистой.

На пробивную прочность жидких диэлектриков в сильной степени оказывают влияние влага, газы, механические и химические примеси. Пробой жидких диэлектриков возникает в результате перегрева жидкости и разрушения ее молекул.

§ 15. Главнейшие электроизоляционные материалы

Асбест — минерал, имеющий волокнистое строение. Длина волокна — от десяти долей миллиметра до нескольких сантиметров. Из асбеста изготовляют пряжу, ленты, ткани, бумагу, картон и другие изделия. Ценным качеством асбеста является его высокая нагревостойкость. Нагрев до 300—400° не меняет свойств асбеста. Благодаря низкой теплопроводности асбест применяют в качестве тепловой изоляции при высоких температурах. Асбест обладает гигроскопичностью, которая уменьшается при пропитке его смолами, битумами и т. п. Асбестовое волокно, пропитанное битумом и подклеенное к проводу лаком, образует дельта-асбестовую изоляцию. Асбест входит в качестве наполнителя в состав пластических масс. Электроизоляционные свойства асбеста невысоки. Электрическая прочность его 0,6—1,2 *кв/мм*. Поэтому он не применяется при высоких напряжениях.

Асбоцемент — пластическая масса холодного прессования. В качестве наполнителя входит асбестовое волокно, связующим веществом является цемент. Асбоцемент идет на изготовление щитков, панелей, оснований аппаратов, труб и т. п. Асбоцемент обладает хорошими механическими свойствами, высокой дугостойкостью, теплостойкостью и негорючестью. Электроизоляционные свойства асбоцемента низки. Пропитка его расплавленным парафином, льняным маслом, битумом и др. уменьшает гигроскопичность асбоцемента.

Бакелит — искусственная смола, получаемая варкой фенола (спирта) с формалином (водным раствором формальдегида — продукта окисления спирта). Полученная в результате варки масса называется бакелитом стадии А. Температура размягчения бакелита А около 80°. Он может растворяться в спирте и в ацетоне. При нагреве до 110—140° бакелит А переходит в бакелит С, который не плавится и не растворяется. Бакелит применяют для пропитки дерева и других материалов, изготовления пластических масс — гетинакса, текстолита, склейки фанеры. Электрическая прочность бакелита 10—20 *кв/мм*; $\varepsilon = 4{,}5—6$.

Бумага изготовляется путем специальной обработки щелочью измельченной древесины деревьев хвойных пород. В электротехнике применяют следующие основные сорта электроизолирующих бумаг: конденсаторную, кабельную, пропиточную (для изготовления листового гетинакса), намоточную (для изготовления бумажно-бакелитовых цилиндров), микалентную (для изготовления клееной слюдяной изоляции), оклеечную (для изолирования листов электротехнической стали).

Галовакс получают хлорированием нафталина. Галовакс имеет температуру плавления 95—135°. Ввиду высокой диэлектрической проницаемости (около 5) галовакс применяют для пропитки бумажных конденсаторов. В отличие от парафина и церезина галовакс негорюч.

Гетинакс изготовляют из бумаги, пропитанной искусственной смолой (бакелитом). Листы бумаги сдавливают прессом, одновременно нагревают до 160—165°, в результате чего бакелит из стадии А переходит в стадию С. Таким образом получают гетинаксовые доски, которые имеют толщину от 0,5 до 50 *мм*. Гетинакс хорошо подвергается механической обработке: сверлению, обтачиванию, фрезерованию, распиливанию. При толщине от 2,5 до 3 *мм* гетинакс можно штамповать. Под действием электрической дуги блестящая поверхность гетинакса обугливается и становится электропроводящей. Гетинакс идет на изготовление щитков, панелей, прокладок, каркасов изоляции в трансформаторах. Электрическая прочность гетинакса 20 — 25 *кв/мм*; $\varepsilon = 5—6$.

Древесина — природный волокнистый органический материал. Применяется для изготовления малоответственных изоляционных деталей. Используют обычно твердые лиственные по-

роды: березу, дуб, бук, клен. Для повышения электрической прочности древесины ее пропитывают парафином, льняным маслом, смолами. Древесину в электротехнике применяют для опорных и крепежных деталей трансформаторов, пазовых клиньев электрических машин, деревянных опор линий связи и электропередач и т. д.

Канифоль — хрупкая смола светло-желтого или коричневого цвета, получаемая путем обработки смолы хвойных деревьев (сосны). Канифоль растворяется в нефтяных маслах, жидких углеводородах, растительных маслах, спирте, скипидаре. Температура размягчения канифоли 50—70°. Электрическая прочность канифоли 10—15 *кв/мм*. Канифоль употребляют для приготовления пропиточных и заливочных масс.

Картон электротехнический отличается от бумаги повышенной толщиной. Изготовляют два сорта картона: ЭВ — для работы на воздухе и ЭМ — для работы в масле. Картон применяют для изготовления мелких деталей. Электрическая прочность картона 8—10 *кв/мм*; $\varepsilon = 2{,}5—4$.

Каучук (резина) получается из сока растений каучуконосов. Такой каучук называют натуральным (НК). Каучук можно получить также искусственным путем. Искусственный или синтетический каучук (СК) изготовляют из спирта или нефтепродуктов. Нагретый до 50° каучук размягчается и становится липким, а при низкой температуре — хрупким. Каучук хорошо растворяется в углеводородах и сероуглероде. Для увеличения механической прочности, нагревостойкости и морозоустойчивости, стойкости к растворителям к каучуку добавляют 3—10% серы. Этот процесс называется вулканизацией, в результате чего получается резина. В электротехнике резину применяют для изоляции установочных и монтажных проводов и кабелей некоторых конструкций, для изолирующих трубок, защитных перчаток, галош, ковриков и т. п. Резина обладает высокими электроизоляционными свойствами, влагостойкостью, непроницаемостью для воды и газов, имеет невысокую нагревостойкость (при нагреве свыше 60—75° резина делается хрупкой и трескается), при действии на резину нефтяных масел она набухает, при действии света — стареет. Электрическая прочность резины 24 *кв/мм*; $\varepsilon = 2{,}5—3$

Лаки электроизоляционные представляют собой растворы твердеющих веществ (смолы, битума, высыхающего масла и др.) в летучих растворителях (бензине, бензоле, спиртах, эфирах, ацетоне, скипидаре и др.). Электроизоляционные лаки делятся на три группы: пропиточные, покровные и клеящие. Пропиточные лаки служат для пропитки пористой, волокнистой или твердой изоляции (бумаги, картона, пряжи, ткани, изоляции обмоток электрических машин и аппаратов). Покровные лаки служат для создания на предметах прочной, водостойкой пленки. При помощи клеящих лаков склеиваются отдельные

листочки слюды. По режиму сушки лаки делятся на лаки горячей (печиой) сушки и лаки холодиой (воздушиой) сушки.

Лакоткани изготовляют из хлопчатобумажной, шелковой или стеклянной ткаии, которую затем пропитывают масляным или масляно-битумиым лаком. Лакоткани примеияют для изолирования обмоток машин и аппаратов. Хлопчатобумажные лакоткаии имеют толщину 0,15—0,25 *мм*, электрическую прочность 35—40 *кв/мм*. Шелковые лакоткани имеют толщину 0,05—0,1 *мм* и повышенную электрическую прочность (в 1,5—2 раза по сравнеиию с хлопчатобумажными лакотканями).

Трансформаторное масло получают из нефти путем ее ступеичатой перегонки. В электрических аппаратах трансформаторное масло служит для обеспечения иадежной электрической изоляции. В силовых трансформаторах оно является, кроме того, охлаждающей средой. В масляных выключателях трансформаторное масло используют в качестве дугогасящей среды. Трансформаторное масло применяют также для заливки высоковольтных вводов и как составиую часть различных заливочных масс. Нефтяные масла после специальной очистки используют в коиденсаторах и кабельном производстве. Важнейшей характеристикой трансформаторного масла как электроизоляциоиного материала является электрическая прочность, которая равна 5—18 *кв/мм*; $\varepsilon = 2{,}2$.

Мрамор — гориая порода зернистокристаллического строения. Глыбы мрамора распиливают иа доски, которые затем фрезеруют и полируют. Недостатки мрамора: гигроскопичность, хрупкость, способность растрескиваться при сильном нагреве, способность разлагаться кислотами. Пропитка мрамора парафином, битумом, канифолью делает его практически негигроскопичным. Электрическая прочность мрамора 2,5—3,5 *кв/мм*; $\varepsilon = 8$.

Парафин — воскообразное вещество, полученное из нефти. Хорошо очищенный парафин — кристаллическое вещество белого цвета. Парафин применяется для пропитки дерева, бумаги, волокнистых веществ, для заливки высокочастотных катушек и трансформаторов, для приготовления изолирующих составов. Парафин нерастворим в воде и спирте, но растворяется в жидких углеводородах: иефтяных маслах, бензине, бензоле. Удельный вес парафина 0,85—0,9, температура плавления 50—55°. Электрическая прочность 16—30 *кв/мм*; $\varepsilon = 2{,}1—2{,}2$.

Пластические массы состоят из связующего вещества (смолы, битум и др.) и наполнителя («каменная мука», «древесная мука», хлопчатобумажиое, асбестовое или стеклянное волокио, слюда, бумага, ткань и т. п.). Кроме того, в состав пластмасс входят пластификаторы — вещества, уменьшающие хрупкость, и красители, придающие изделию нужную окраску. Связующее вещество, смешанное с наполнителем, заклады-

вается в пресс-форму и при помощи давления и нагрева (иногда только давления) получается изделие нужных размеров и конфигурации. Пластмассы используют в качестве электроизолирующих, а также конструкционных материалов.

Пропиточные и заливочные составы (компаунды) применяются для пропитки и заливки различных частей электрических установок. Эти составы изолируют отдельные токоведущие части, создают водостойкую изоляцию и улучшают условия охлаждения. Пропиточные и заливочные составы изготовляют из нефтяных битумов и сплавов минерального масла с канифолью. Иногда для увеличения теплопроводности в битумы вводят наполнитель, например кварцевый песок.

Слюда — минерал кристаллического строения. Благодаря своему строению слюда легко расщепляется на отдельные листочки. Она обладает высокой электрической прочностью (80—200 *кв/мм*), высокой нагревостойкостью, влагостойкостью, механической прочностью и гибкостью. В электротехнике применяют два вида слюды: мусковит и флогопит, различающиеся по составу, цвету и свойствам. Лучшей слюдой является мусковит. Из листочков слюды штампуют прямоугольные пластинки для конденсаторов, шайбы для электрических приборов и т. п. Однако чаще отдельные листочки слюды при помощи клеящих лаков (глифталевого, битумно-масляного, шеллачного и др.) склеивают между собой. Такой материал называется миканитом. Различают миканиты: коллекторный (для изоляции коллекторных пластин), прокладочный (для изоляции шайб, прокладок), формовочный (прессуется при нагреве для изготовления фасонных деталей), гибкий (для межвитковой и пазовой изоляции электрических машин), жароупорный (для электронагревательных приборов). Иногда пластинки слюды наклеивают на бумагу или ткани (микалента, микафолий, стекломикафолий).

Стекло получают переплавкой кремнезема — SiO_2 (в виде песка) с окислами различных металлов — натрия, калия, свинца, кальция (в виде соды, селитры, буры, различных каменных пород). Стекло — аморфное тело, поэтому оно не имеет определенной температуры плавления. При нагреве стекло размягчается и становится жидким. В этом состоянии стекло можно выдувать, вытягивать, прессовать, отливать. Физические и механические свойства стекла зависят от его состава и обработки. Если обычное стекло хрупкое, то особо закаленное стекло — сталинит обладает высокой прочностью на удар. Стекло практически водонепроницаемо, на него не действуют кислоты (за исключением плавиковой) и щелочи. Однако, стекла, содержащие только щелочные окислы (Na_2O, K_2O), хорошо растворяются в воде (жидкое стекло). Электроизоляционные свойства стекла очень высоки. С нагревом стекло быстро теряет изоляционные качества. В электротехнике стекло используют для

изготовления баллонов осветительных и электроиных ламп, изоляторов и т. п. Из стекла можно получать волокна диаметром до 0,005—0,006 *мм*. Отдельные волокна свиваются в нити. Стеклянные нити (стеклопряжа) используются для получения нагревостойкой изоляции проводников марки ПСД. Электрическая прочиость стекла 10—40 *кв/мм*; $\varepsilon = 5{,}5—10$.

Текстолит — пластмасса, представляющая собой многослойную ткаиь, пропитанную резольной смолой и спрессованиую под большим давлением при 150°. По сравнению с гетииаксом текстолит обладает следующими положительными свойствами: меньшей хрупкостью, высокими механическими качествами и стойкостью к истираиию. Его отрицательиыми качествамн являются: худшие электрические свойства, меньшая влагостойкость, дороговизиа (в 5—6 раз дороже гетинакса). Текстолит, изготовлеиный иа основе стеклянной ткани, называется стеклотекстолитом. Он обладает высокими электрическими свойствами, влагостойкостью, нагревостойкостью и большой механической прочностью. Текстолит легко поддается механической обработке иа стаиках. Он применяется для изготовления роликов, бесшумных зубчатых колес, вкладышей для подшипников и т. д. Электрическая прочность текстолита 27—45 *кв/мм*.

Фарфор электротехнический является наиболее распространенным керамическим электроизоляционным материалом. В состав фарфора входят: каолин — белая глина, огнеупорная глина, кварц и полевой шпат. Изготовление фарфоровых изделий состоит из следующих операций: измельчение составных частей фарфора и перемешивание их с водой в одиородную массу. Путем прессования, обтачивания, отливки в гипсовые формы или выдавливания из этой массы получают изделия нужной конфигурации. Для удаления избытка воды изделия сушат, затем их покрывают стекловидной массой — глазурью, которая уменьшает гигроскопичность фарфора, придает определенную окраску изделиям и создает при обжиге ровную, гладкую поверхность. После глазуровки изделия опять сушат и обжигают в печах при температуре 1320—1450°. Фарфор характеризуется высокой теплостойкостью, стойкостью к электрическим дугам и весьма малым водопоглощением. Из фарфора изготовляют линейиые (подвесные и штыревые) изоляторы, станционные (опорные и проходные) изоляторы, аппаратные изоляторы, установочные фарфоровые изделия (ролики, детали предохранителей, патроиов, штепселей и т. п.). Электрическая прочность фарфора 6—10 *кв/мм*; $\varepsilon = 5—6{,}5$. Кроме фарфора, применяется другой керамический материал — стеатит, изготовляемый на осиове минерала — талька. Стеатит по сравнению с фарфором обладает более высокими электроизоляционными и физико-механическими свойствами.

Фибра изготовляется из пористой бумаги, обработаниой

раствором хлористого цинка. Фибра хорошо поддается механической обработке. Большим недостатком фибры является ее гигроскопичность. Фибра разъедается кислотами и щелочами. Из нее изготовляют мелкие детали, прокладки, каркасы катушек. Электрическая прочность фибры 5—11 *кв/мм*; $\varepsilon = 2{,}5—5$. Тонкая фибра (0,1—0,5 *мм*) называется летероидом.

Церезин получают путем очистки воскообразного минерала — озокерита или петролатума. Церезин по сравнению с парафином имеет повышенную температуру плавления (65—80°) и повышенную стойкость против окисления. Церезин применяют для пропитки бумажных конденсаторов, приготовления изолирующих составов и др. Электрическая прочность церезина 15 *кв/мм*.

Шелк получают из коконов червя-шелкопряда. Толщина нити 0,01—0,015 *мм*. Шелковые нити идут на изоляцию проводов и изготовление ткани.

Шеллак — природная смола тропических растений, температура его плавления 100—200°. Шеллак имеет вид желтоватых или коричневых чешуек, легко растворяется в спирте. Шеллак применяется для приготовления заливочных масс, изоляционных и клеящих лаков, пропитки изоляционных лент; $\varepsilon = 2{,}7—3{,}7$.

Шифер — сланец, имеет слоистое строение. Шифер негигроскопичен, легко поддается механической обработке. Он идет на изготовление панелей, щитков для рубильников и т. п. Электрическая прочность шифера 1,5—3 *кв/мм*; $\varepsilon = 6—7{,}5$.

Эбонит (твердая резина) получается из каучука путем добавки в него 20—50% серы. Эбонит выпускается в виде листов (досок), палок и трубок, хорошо поддается механической обработке. Он применяется в технике слабых токов, в эбонитовые трубки протаскиваются провода при проходе сквозь стены и при скрытой проводке.

Задачи для самостоятельного решения

1. Два электрических заряда $5 \cdot 10^{-5}$ *к* и $3 \cdot 10^{-4}$ *к* находятся на расстоянии 10 *см* один от другого в пустоте. Определить силу взаимодействия между зарядами.

2. Два электрических заряда 40 ед. СГСЭ и 25 ед. СГСЭ находятся на расстоянии 5 *см* в трансформаторном масле. Определить силу взаимодействия между зарядами.

3. На заряд $2 \cdot 10^{-7}$ *к* действует сила 0,1 *н*. Определить расстояние, на котором находится второй заряд $4{,}5 \cdot 10^{-7}$ *к*. Оба заряда находятся в пустоте.

4. Определить напряженность электрического поля на расстоянии 20 *см* от заряда $2 \cdot 10^{-6}$ *к* в пустоте.

5. Определить заряд, который создает на расстоянии 30 *см* в пустоте напряженность электрического поля, равную $40 \frac{в}{см}$.

6. Определить потенциал в точке электрического поля, если на перенос заряда $5 \cdot 10^{-7}$ *к* в эту точку поля было затрачено 0,05 *дж* работы.

7. Потенциал точки A — 50 *в*, точки B — 80 *в*. Определить работу, которую нужно затратить, чтобы заряд в 5 *к* перенести из точки A в точку B.

8. Определить емкость проводника, если ему сообщили заряд $2 \cdot 10^{-3}$ *к*, а потенциал проводника при этом увеличился на 500 *в*.

9. Определить емкость плоского конденсатора, если площадь его обкладок 40 *см*^{2}. Диэлектриком конденсатора является бумага толщиной 0,1 *мм*, пропитанная парафином.

Контрольные вопросы

1. Как устроен атом вещества с точки зрения электронной теории?
2. Что называется проводником и изолятором? Привести примеры.
3. Как читается закон Кулона? Для чего служит формула Кулона?
4. Что называется электрическим полем?
5. Что называется напряженностью электрического поля?
6. Как графически определить напряженность электрического поля, созданного несколькими точечными электрическими зарядами?
7. Как распределяются части электрического заряда на поверхности проводников различной формы?
8. Что произойдет с проводником, если его внести в электрическое поле?
9. Что произойдет с диэлектриком, если его внести в электрическое поле?
10. Что называется электрическим потенциалом? В каких единицах он измеряется? Как его определить?
11. Как определить работу по переносу заряда из одной точки электрического поля в другую?
12. Что называется электрической емкостью? В каких единицах она измеряется?
13. Как устроены электрические конденсаторы и для чего они служат?

$$\rho = S \frac{\varepsilon_0 \varepsilon}{0{,}1\,м}$$

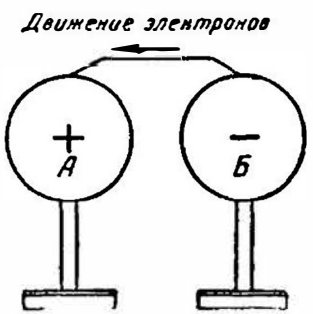
$$F = \frac{q_1 q_2}{\varepsilon_0 r^2}$$

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 16. Понятие об электрическом токе

Зарядим два металлических шара, установленных на изолирующих подставках (фиг. 21), причем один шар *А* зарядим положительным электричеством, а другой *Б* — отрицательным электричеством. Если соединить шары металлическим проводником, то электроны будут переходить с шара *Б*, где имеется их избыток, на шар *А*, где их недостаток. Движение электронов по проводнику называется электрическим током [1]. Электроны не проходят в своем движении всю длину проводника. Наоборот, они пробегают очень небольшие расстояния до столкновения с другими электронами, атомами или молекулами. Эти расстояния называются длиной свободного пробега электронов.



Фиг. 21. Движение электронов по проводнику

Если шар *А* непрерывно заряжать положительным электричеством, а шар *Б* — отрицательным электричеством, то электрический ток в проводнике также будет проходить непрерывно.

Практически электрический ток получают от специальных источников: гальванических элементов, аккумуляторов, генераторов.

Электрический ток непосредственно наблюдать нельзя. О прохождении тока можно судить только по тем действиям, которые он производит. Подробно о действиях электрического тока будет рассказано ниже, в соответствующих местах книги.

[1] В электротехнике условно принято считать направление тока противоположным направлению движения электронов в проводнике. Иначе говоря, направление тока принято считать совпадающим с направлением движения положительных зарядов.

Сейчас отметим следующие признаки, по которым легко судить о наличии тока:

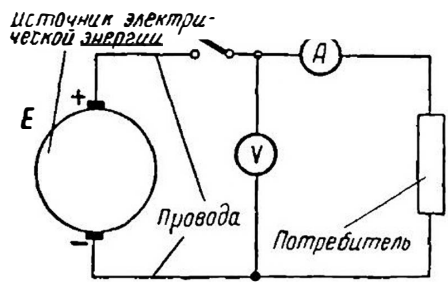
1) ток, проходя через растворы солей, щелочей, кислот, а также через расплавленные соли, разлагает их на составные части;

2) проводник, по которому проходит электрический ток, нагревается;

3) электрический ток, проходя по проводнику, создает вокруг него магнитное поле.

§ 17. Электрическая цепь и ее элементы

Простейшая электрическая установка состоит из источника (гальванического элемента, аккумулятора, генератора и т. п.), потребителей или приемников электрической энергии (ламп накаливания, электронагревательных приборов, электродвигателей и т. п.) и соединительных проводов, соединяющих зажимы источника напряжения с зажимами потребителя.



Фиг. 22. Схема электрической цепи

Источник электрической энергии дает электрическую энергию, потребитель эту энергию преобразует в другие виды энергии: свет, тепло, движение и т. д. Совокупность соединенных между собой источников электрической энергии, приемников и соединяющих их проводов (линия передачи) называется электрической цепью (фиг. 22). Последняя делится на внутреннюю и внешнюю части. К внутренней части цепи относится сам источник электрической энергии. Во внешнюю часть цепи входят соединительные провода, потребители, рубильники, выключатели, электроизмерительные приборы, т. е. все то, что присоединено к зажимам источника электрической энергии.

Постоянный электрический ток может протекать только по замкнутой электрической цепи. Разрыв цепи в любом месте вызывает прекращение электрического тока.

§ 18. Величина тока. Плотность тока

Если через поперечное сечение проводника проходит Q кулонов электричества за t секунд, то количество электричества, прошедшего через поперечное сечение проводника в течение одной секунды, называется величиной тока и обозначается буквой I.

$$I = \frac{Q}{t}.$$

Единицей величины тока является 1 ампер, определяемый как количество электричества в 1 кулон, прошедшего через поперечное сечение проводника в 1 секунду, т. е.

$$1 \text{ ампер} = \frac{1 \text{ кулон}}{1 \text{ секунда}}$$

Ток в цепи измеряется электрическим прибором — амперметром, внешний вид которого представлен на фиг. 23.

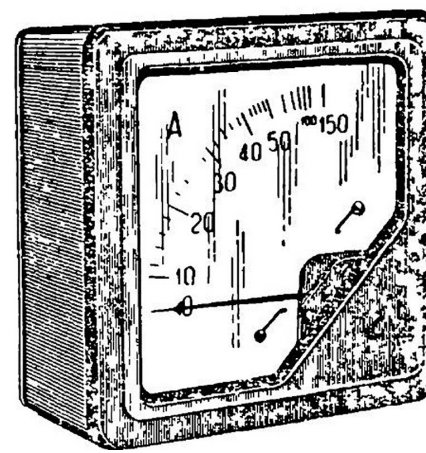
Тысячные доли ампера — миллиамперы измеряются миллиамперметром. Если количество электричества, протекающего по проводнику, будет меняться, то величина тока также будет меняться.

В этом случае среднее значение тока за данный промежуток времени определяется по формуле:

$$i = \frac{\Delta Q}{\Delta t},$$

где ΔQ — изменение количества электричества;

Δt — изменение времени.



Фиг. 23. Внешний вид ампермегра

Чем меньше промежуток времени Δt, тем меньше среднее значение тока будет отличаться от истинного мгновенного значения тока в данный момент.

Ток, не изменяющийся по величине и по направлению, называется постоянным током.

Постоянный ток дают нам гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы постоянного тока, если условия работы электрической цепи не меняются.

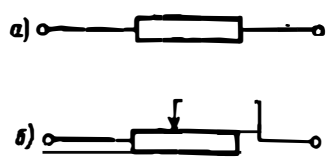
Отношение величины тока I к площади поперечного сечения проводника S называется плотностью тока и обозначается греческой буквой δ (дельта).

$$\delta = \frac{I}{S},$$

так как обычно площадь сечения проводников дается в квадратных миллиметрах, то плотность тока измеряется в $а/мм^2$.

§ 19. Сопротивление и проводимость проводников. Зависимость сопротивления проводников от физических условий

При замыкании электрической цепи, на зажимах которой имеется разность потенциалов, возникает электрический ток. Свободные электроны под влиянием электрических сил поля перемещаются вдоль проводника. В своем движении электроны наталкиваются на атомы проводника и отдают им запас своей кинетической энергии. Скорость движения электронов непрерывно изменяется: при столкновении электронов с атомами, молекулами и другими электронами она уменьшается, потом под действием электрического поля увеличивается и снова уменьшается при новом столкновении. В результате этого в проводнике устанавливается равномерное движение потока электронов со скоростью нескольких долей сантиметра в секунду. Следовательно, электроны, проходя по проводнику, всегда встречают с его стороны сопротивление своему движению. При прохождении электрического тока через проводник последний нагревается.



Фиг. 24. Условное обозначение электрического сопротивления

Электрическим сопротивлением проводника, которое обозначается латинской буквой *r*, называется свойство тела или среды превращать электрическую энергию в тепловую при прохождении по нему электрического тока. На схемах электрическое сопротивление обозначается так, как показано на фиг. 24, *а*.

Переменное электрическое сопротивление, служащее для изменения тока в цепи, называется реостатом. На схемах реостаты обозначаются, как показано на фиг. 24, *б*. В общем виде реостат изготовляется из проволоки того или иного сопротивления, намотанной на изолирующем основании. Ползунок или рычаг реостата ставится в определенное положение, в результате чего в цепь вводится нужное сопротивление.

Длинный проводник малого поперечного сечения создает току большое сопротивление. Короткие проводники большого поперечного сечения оказывают току малое сопротивление.

Если взять два проводника из разного материала, но одинаковой длины и сечения, то проводники будут проводить ток по-разному. Это показывает, что сопротивление проводника зависит от материала самого проводника.

Температура проводника также оказывает влияние на его сопротивление. С повышением температуры сопротивление металлов увеличивается, а сопротивление жидкостей и угля уменьшается. Только некоторые специальные металлические

сплавы (манганин, констаитан, никелин и др.) с увеличением температуры своего сопротивления почти не меняют.

Итак, мы видим, что электрическое сопротивление проводника зависит от: 1) длины проводника, 2) поперечного сечения проводника, 3) материала проводника, 4) температуры проводника.

За единицу сопротивления принят один ом. Ом часто обозначается греческой прописной буквой Ω (омега). Поэтому вместо того чтобы писать «Сопротивление проводника равно 15 *ом*», можно написать просто: $r = 15\ \Omega$.

1000 *ом* называется 1 к и л о о м (1 *ком*, или 1кΩ),

1 000 000 *ом* называется 1 м е г о м (1 *мгом*, или 1 *М*Ω).

При сравнении сопротивления проводников из различных материалов необходимо брать для каждого образца определенную длину и сечение. Тогда мы сможем судить о том, какой материал лучше или хуже проводит электрический ток.

Сопротивление в омах проводника длиной 1 *м*, сечением 1 *мм*² называется у д е л ь н ы м с о п р о т и в л е н и е м и обозначается греческой буквой ρ (ро). В табл. 1 даны удельные сопротивления некоторых проводников.

Таблица 1

Удельные сопротивления различных проводников [1]

Материал проводника	Удельное сопротивление ρ в $\frac{ом\ мм^2}{м}$
Серебро	0,016
Медь	0,0175
Алюминий	0,03
Вольфрам	0,05
Железо	0,13
Свинец	0,2
Никелин (сплав меди, никеля и цинка)	0,42
Манганин (сплав меди, никеля и марганца)	0,43
Константан (сплав меди, никеля и алюминия)	0,5
Ртуть	0,94
Нихром (сплав никеля, хрома, железа и марганца)	1,1

Из таблицы видно, что железная проволока длиной 1 *м* и сечением 1 *мм*² обладает сопротивлением 0,13 *ом*. Чтобы получить 1 *ом* сопротивления, нужно взять 7,7 *м* такой проволоки. Наименьшим удельным сопротивлением обладает серебро. 1 *ом* сопротивления можно получить, если взять 62,5 *м* серебряной

[1] Подробная характеристика металлов и сплавов приведена в табл. 8 и 9.

проволоки сечением 1 *мм*². Серебро — лучший проводник, но большая стоимость серебра исключает возможность его массового применения. После серебра в таблице идет медь: 1 *м* медной проволоки сечением 1 *мм*² обладает сопротивлением 0,0175 *ом*. Чтобы получить сопротивление в 1 *ом*, нужно взять 57 *м* такой проволоки.

Химически чистая, полученная путем рафинирования, медь нашла себе повсеместное применение в электротехнике для изготовления проводов, кабелей, обмоток электрических машин и аппаратов. Широко применяют также в качестве проводников алюминий и железо.

Сопротивление проводника можно определить по формуле:

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

где r — сопротивление проводника в омах;
ρ — удельное сопротивление проводника;
l — длина проводника в *м*;
S — сечение проводника в *мм*².

Пример 1. Определить сопротивление 200 *м* железной проволоки сечением 5 *мм*².

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0{,}13 \cdot 200}{5} = 5{,}2 \text{ ом}.$$

Пример 2. Вычислить сопротивление 2 *км* алюминиевой проволоки сечением 2,5 *мм*²,

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0{,}03 \cdot 2000}{2{,}5} = 24 \text{ ом}.$$

Из формулы сопротивления легко можно определить длину, удельное сопротивление и сечение проводника.

Пример 3. Для радиоприемника необходимо намотать сопротивление в 30 *ом* из никелиновой проволоки сечением 0,21 *мм*². Определить необходимую длину проволоки.

$$l = \frac{r \cdot S}{\rho} = \frac{30 \cdot 0{,}21}{0.42} = 15 \text{ м}.$$

Пример 4. Определить сечение 20 *м* нихромовой проволоки, если сопротивление ее равно 25 *ом*.

$$S = \frac{\rho \cdot l}{r} = \frac{1{,}1 \cdot 20}{25} = 0{,}88 \text{ мм}^2.$$

Пример 5. Проволока сечением 0,5 *мм*² и длиной 40 *м* имеет сопротивление 16 *ом*. Определить материал проволоки.

Материал проводника характеризует его удельное сопротивление.

$$\rho = \frac{r \cdot S}{l} = \frac{16 \cdot 0{,}5}{40} = 0{,}2.$$

По таблице удельных сопротивлений находим, что таким сопротивлением обладает свинец.

Выше было указано, что сопротивление проводников зависит от температуры. Проделаем следующий опыт. Намотаем в виде спирали несколько метров тонкой металлической проволоки и включим эту спираль в цепь аккумулятора. Для измерения тока в цепь включаем амперметр. При нагревании спирали в пламени горелки можно заметить, что показания амперметра будут уменьшаться. Это показывает, что с нагревом сопротивление металлической проволоки увеличивается.

У некоторых металлов при нагревании на 100° сопротивление увеличивается на 40—50%. Имеются сплавы, которые незначительно меняют свое сопротивление с нагревом. Некоторые специальные сплавы практически не меняют сопротивления при изменении температуры. Сопротивление металлических проводников при повышении температуры увеличивается, сопротивление электролитов (жидких проводников), угля и некоторых твердых веществ, наоборот, уменьшается.

Способность металлов менять свое сопротивление с изменением температуры используется для устройства термометров сопротивления. Такой термометр представляет собой платиновую проволоку, намотанную на слюдяной каркас. Помещая термометр, например, в печь и измеряя сопротивление платиновой проволоки до и после нагрева, можно определить температуру в печи.

Изменение сопротивления проводника при его нагревании, приходящееся на 1 *ом* первоначального сопротивления и на 1° температуры, называется температурным коэффициентом сопротивления и обозначается буквой α.

Если при температуре t_0 сопротивление проводника равно r_0, а при температуре t равно r_t, то температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha = \frac{r_t - r_0}{r_0 (r - t_0)}.$$

Примечание. Расчет по этой формуле можно производить лишь в определенном интервале температур (примерно до 200° С).

Приводим значения температурного коэффициента сопротивления α для некоторых металлов (табл. 2).

Таблица 2

Значения температурного коэффициента для некоторых металлов

Металл	α	Металл	α
Серебро	0,0035	Ртуть	0,0090
Медь	0,0040	Никелин	0,0003
Железо	0,0066	Константан	0,000005
Вольфрам	0,0045	Нихром	0,00016
Платина	0,0032	Манганин	0,00005

Из формулы температурного коэффициента сопротивления определим r_t:

$$r_t = r_0[1 \pm \alpha(t - t_0)].$$

Пример 6. Определить сопротивление железной проволоки, нагретой до 200°, если сопротивление ее при 0° было 100 *ом*.

$$r_t = r_0[1 + \alpha(t - t_0)] = 100\,(1 + 0{,}0066 \cdot 200) = 232\ ом.$$

Пример 7. Термометр сопротивления, изготовленный из платиновой проволоки, в помещении с температурой 15° имел сопротивление 20 *ом*. Термометр поместили в печь и через некоторое время было измерено его сопротивление. Оно оказалось равным 29,6 *ом*. Определить температуру печи.

$$t = \frac{r_t - r_0}{r_0 \alpha} + t_0 = \frac{29{,}6 - 20}{20 \cdot 0{,}0032} + 15 = 165°.$$

До сих пор мы рассматривали сопротивление проводника как препятствие, которое оказывает проводник электрическому току. Но все же ток по проводнику проходит. Следовательно, кроме сопротивления (препятствия), проводник обладает также способностью проводить электрический ток, т. е. проводимостью.

Чем бóльшим сопротивлением обладает проводник, тем меньшую он имеет проводимость, тем хуже он проводит электрический ток, и, наоборот, чем меньше сопротивление проводника, тем большей проводимостью он обладает, тем легче току пройти по проводнику. Поэтому сопротивление и проводимость проводника есть величины обратные.

Из математики известно, что число, обратное 5, есть $\frac{1}{5}$ и, наоборот, число, обратное $\frac{1}{7}$, есть 7. Следовательно, если сопротивление проводника обозначается буквой r, то проводимость определяется как $\frac{1}{r}$. Обычно проводимость обозначается буквой g.

Электрическая проводимость измеряется в $\frac{1}{ом}$ или в сименсах.

Пример 8. Сопротивление проводника равно 20 *ом*. Определить его проводимость.

Если $r = 20$ *ом*, то

$$g = \frac{1}{r} = \frac{1}{20} = 0{,}05\,\frac{1}{ом}.$$

Пример 9. Проводимость проводника равна $0{,}1\,\frac{1}{ом}$. Определить его сопротивление.

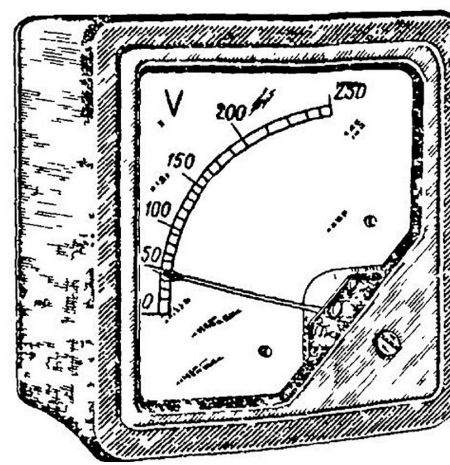
$$\text{Если } g = 0{,}1\,\frac{1}{ом}, \quad \text{то } r = \frac{1}{0{,}1} = 10\ ом.$$

§ 20. Электродвижущая сила источника электрической энергии. Напряжение

Чтобы электрический ток проходил по цепи продолжительное время, нужно непрерывно поддерживать на полюсах источника напряжения разность потенциалов. Аналогично этому, если соединить трубкой два сосуда с различными уровнями воды, то вода будет переходить из одного сосуда в другой до тех пор, пока уровни в сосудах не сравняются. Доливая воду в один сосуд и отводя ее из другого, можно добиться того, что движение воды по трубке между сосудами будет продолжаться непрерывно.

При работе источника электрической энергии электроны с анода переходят на катод.

Отсюда можно заключить, что внутри источника электрической энергии действует сила, которая должна непрерывно поддерживать ток в цепи, т. е. иначе говоря, должна обеспечивать работу этого источника.



Фиг. 25. Внешний вид вольтметра

Причина, которая устанавливает и поддерживает разность потенциалов, вызывает ток в цепи, преодолевая ее внешнее и внутреннее сопротивление, называется электродвижущей силой (сокращенно э. д. с.) и обозначается буквой E.

Электродвижущая сила источников электрической энергии возникает под влиянием причин, специфических для каждого из них.

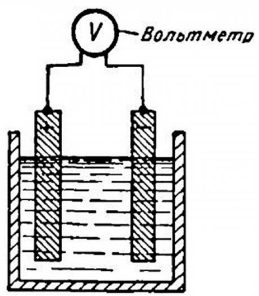
В химических источниках электрической энергии (гальванических элементах, аккумуляторах) э. д. с. получается в результате химических реакций, в генераторах э. д. с. возникает вследствие электромагнитной индукции, в термоэлементах — за счет тепловой энергии.

Разность потенциалов, вызывающая прохождение тока через сопротивление участка электрической цепи, называется напряжением между концами этого участка. Электродвижущая сила и напряжение измеряется в вольтах. Для измерения э. д. с. и напряжения служат особые приборы — вольтметры (фиг. 25).

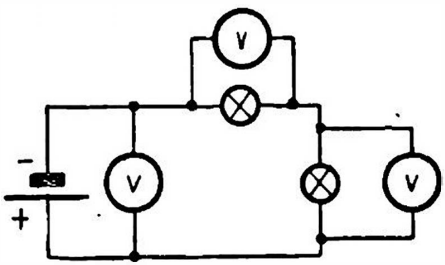
Тысячные доли вольта — милливольты — измеряются милли-

вольтметрами, тысячи вольт — киловольты — измеряются киловольтметрами.

Чтобы измерить э. д. с. источника электрической энергии необходимо вольтметр включить к зажимам этого источника при разомкнутой внешней цепи (фиг. 26). Для измерения напряжения на каком-либо участке электрической цепи вольтметр нужно включить к концам этого участка (фиг. 27).



Фиг. 26. Измерение вольтметром электродвижущей силы элемента



Фиг. 27. Измерение вольтметром напряжений на различных участках электрической цепи

§ 21. Закон Ома

Соберем электрическую цепь (фиг. 28, *а*), состоящую из аккумулятора *1* напряжением в 2 *в*, рычажного реостата *2*, двух измерительных приборов — вольтметра *3* и амперметра *4* и соединительных проводов *5*. Установим в цепи при помощи реостата сопротивление, равное 2 *ом*. Тогда вольтметр, включенный на зажимы аккумулятора, покажет напряжение в 2 *в*, а амперметр, включенный последовательно в цепь, покажет ток, равный 1 *а*. Увеличим напряжение до 4 *в* путем включения другого аккумулятора (фиг. 28, *б*). При том же сопротивлении в цепи — 2 *ом* — амперметр покажет уже ток в 2 *а*. Аккумулятор напряжением 6 *в* изменит показание амперметра до 3 *а* (фиг. 28, *в*). Сведем наши наблюдения в табл. 3.

Таблица 3

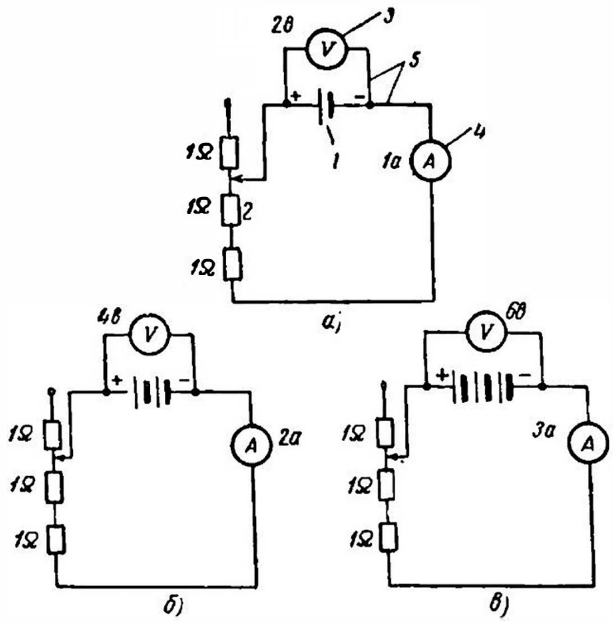
Зависимость тока в цепи от напряжения при неизменном сопротивлении

Напряжение цепи в *в*	Сопротивление цепи в *ом*	Ток цепи в *а*
2	2	1
4	2	2
6	2	3

Отсюда можно сделать вывод, что ток в цепи при постоянном сопротивлении тем больше, чем больше напряжение этой

цепи, причем ток будет увеличиваться во столько раз, во сколько раз увеличивается напряжение.

Теперь в такой же цепи поставим аккумулятор с напряжением 2 *в* и установим при помощи реостата сопротивление в цепи, равное 1 *ом* (фиг. 29, *а*). Тогда амперметр покажет 2 *а*.



Фиг. 28. Изменение тока в электрической цепи путем изменения напряжения при неизменном сопротивлении

Увеличим реостатом сопротивление до 2 *ом* (фиг. 29, *б*). Показание амперметра (при том же напряжении цепи) будет уже 1 *а*.

При сопротивлении в цепи 3 *ом* (фиг. 29, *в*) показание амперметра будет $\frac{2}{3}$ *а*.

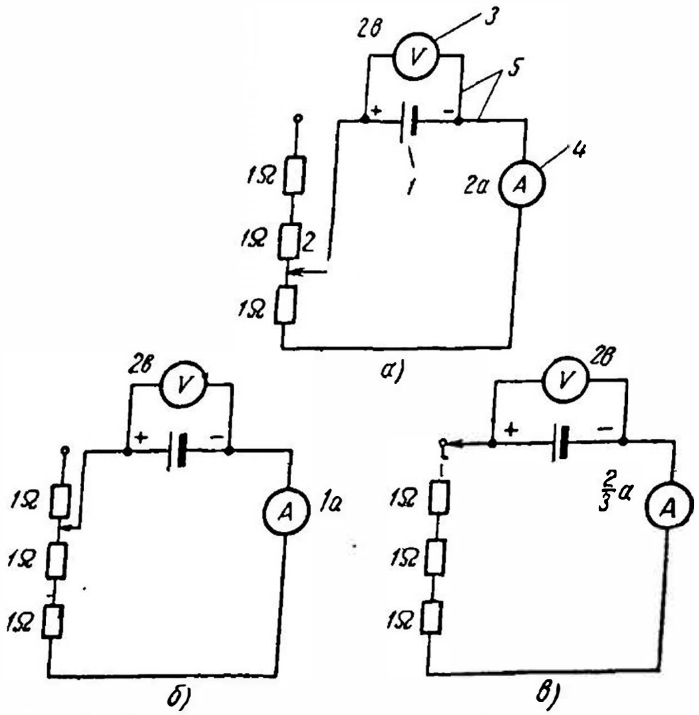
Результаты опыта сведем в табл. 4.

Таблица 4

Зависимость тока в цепи от сопротивления при неизменном напряжении

Напряжение цепи в	Сопротивление цепи в *ом*	Ток цепи в *а*
2	1	2
2	2	1
2	3	$\frac{2}{3}$

Отсюда следует вывод, что при постоянном напряжении ток в цепи будет тем больше, чем меньше сопротивление этой цепи, причем ток в цепи увеличивается во столько раз, во сколько раз уменьшается сопротивление цепи.



Фиг. 29. Изменение тока в электрической цепи путем изменения сопротивления при неизменном напряжении

Как показывают опыты, ток на участке цепи прямо пропорционален напряжению на этом участке и обратно пропорционален сопротивлению того же участка. Эта зависимость известна под названием закона Ома.

Если обозначим: I — ток в амперах, U — напряжение в вольтах, r — сопротивление в омах, то закон Ома можно представить формулой:

$$I = \frac{U}{r},$$

т. е. ток на данном участке цепи равен напряжению на этом участке, деленному на сопротивление того же участка.

Пример 10. Определить ток, который будет проходить по нити лампы накаливания, если нить имеет неизменное сопротивление 240 ом, а лампа включена в сеть с напряжением 120 в.

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{240} = 0{,}5\ а.$$

Пользуясь формулой закона Ома, можно определить также напряжение и сопротивление цепи.

$$U = I \cdot r,$$

т. е. напряжение цепи равно произведению тока на сопротивление этой цепи и

$$r = \frac{U}{I},$$

т. е. сопротивление цепи равно напряжению, деленному на ток цепи.

Пример 11. Какое нужно напряжение, чтобы в цепи с сопротивлением 6 *ом* протекал ток 20 *а*?

$$U = I \cdot r = 20 \cdot 6 = 120 \text{ в}.$$

Пример 12. По спирали электрической плитки протекает ток в 5 *а*. Плитка включена в сеть с напряжением 220 *в*. Определить сопротивление спирали электрической плитки.

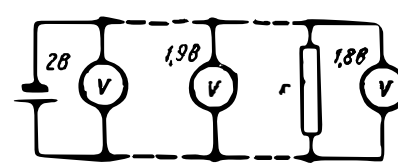
$$r = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} = 44 \text{ ом}.$$

Если в формуле $U = I \cdot r$ ток равен 1 *а*, а сопротивление 1 *ом*, то напряжение будет равно 1 *в*:

$$1 \text{ в} = 1 \text{ а} \cdot 1 \text{ ом}.$$

Отсюда заключаем: напряжение в 1 *в* действует в цепи с сопротивлением 1 *ом* при токе в 1 *а*.

На фиг. 30 приведена электрическая цепь, состоящая из аккумулятора, сопротивления *r* и длинных соединительных проводов, имеющих свое определенное сопротивление.



Фиг. 30. Потеря напряжения вдоль электрической цепи

Как видно из фигуры, вольтметр, присоединенный к зажимам аккумулятора, показывает 2 *в*. Уже в середине линии вольтметр показывает только 1,9 *в*, а около сопротивления *r* напряжение равно всего 1,8 *в*. Такое уменьшение напряжения вдоль цепи между отдельными точками этой цепи называется потерей напряжения.

Потеря напряжения вдоль электрической цепи происходит потому, что часть приложенного напряжения расходуется на преодоление сопротивления цепи. При этом потеря напряжения на участке цепи будет тем больше, чем больше ток и чем больше сопротивление этого участка цепи. Из закона Ома для участка цепи следует, что потеря напряжения в вольтах на

участке цепи равно току в амперах, протекающему по этому участку, умноженному на сопротивление в омах того же участка:

$$U = I \cdot r.$$

Пример 13. От генератора, напряжение на зажимах которого 115 *в*, электроэнергия передается электродвигателю по проводам, сопротивление которых 0,1 *ом*. Определить напряжение на зажимах двигателя, если он потребляет ток в 50 *а*.

Очевидно, что на зажимах двигателя напряжение будет меньше, чем на зажимах генератора, так как в линии будет потеря напряжения. По формуле

$$U = I \cdot r = 50 \cdot 0{,}1 = 5 \text{ в}.$$

Если в линии потеря напряжения равна 5 *в*, то напряжение у электродвигателя будет 115—5=110 *в*.

Пример 14. Генератор дает напряжение 240 *в*. Электроэнергия по линии из двух медных проводов длиной по 350 *м*, сечением 10 *мм*² передается к электродвигателю, потребляющему ток в 15 *а*. Требуется узнать напряжение на зажимах двигателя.

Напряжение на зажимах двигателя будет меньше напряжения генератора на величину потери напряжения в линии. Потеря напряжения в линии $U = I \cdot r$.

Так как сопротивление r проводов неизвестно, определяем его по формуле:

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S} = \frac{0{,}0175 \cdot 700}{10} = 1{,}22 \text{ ом}$$

(длина l равна 700 *м*, так как току приходится идти от генератора к двигателю и оттуда обратно к генератору).

Подставляя r в формулу, получим:

$$U = I \cdot r = 15 \cdot 1{,}22 = 18{,}3 \text{ в}.$$

Следовательно, напряжение на зажимах двигателя будет 240—18,3= =221,7 *в*.

Пример 15. Определить поперечное сечение алюминиевых проводов, которое необходимо применить, чтобы подвести электрическую энергию к двигателю, работающему при напряжении в 120 *в* и токе в 20 *а*. Энергия к двигателю будет подаваться от генератора напряжением 127 *в* по линии длиной 150 *м*.

Находим допустимую потерю напряжения:

$$127 - 120 = 7 \text{ в}.$$

Сопротивление проводов линии должно быть равно:

$$r = \frac{U}{I} = \frac{7}{20} = 0{,}35 \text{ ом}.$$

Из формулы

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

определяем сечение провода:

$$S = \frac{\rho \cdot l}{r} = \frac{0{,}03 \cdot 300}{0{,}35} = 25{,}7 \text{ мм}^2.$$

По справочнику выбираем имеющееся сечение 25 *мм*².

Если ту же линию выполнить медным проводом, то сечение его будет равно:

$$S = \frac{\rho \cdot l}{r} = \frac{0{,}0175 \cdot 300}{0{,}35} = 15 \text{ мм}^2.$$

Выбираем сечение 16 мм².

Отметим еще, что иногда приходится умышленно добиваться потери напряжения, чтобы уменьшить величину приложенного напряжения.

Пример 16. Для устойчивого горения электрической дуги требуется ток 10 *а* при напряжении 40 *в*. Определить величину добавочного сопротивления, которое нужно включить последовательно с дуговой установкой, чтобы питать ее от сети с напряжением 120 *в*.

Потеря напряжения в добавочном сопротивлении составит:

$$120 - 40 = 80 \text{ в}.$$

Зная потерю напряжения в добавочном сопротивлении и ток, протекающий через него, можно по закону Ома для участка цепи определить величину этого сопротивления:

$$r = \frac{U}{I} = \frac{80}{10} = 8 \text{ ом}$$

При рассмотрении электрической цепи мы до сих пор не принимали в расчет того, что путь тока проходит не только по внешней части цепи, но также и по внутренней части цепи, внутри самого элемента, аккумулятора или другого источника напряжения.

Электрический ток, проходя по внутренней части цепи, преодолевает ее внутреннее сопротивление и потому внутри источника напряжения также происходит падение напряжения.

Следовательно, электродвижущая сила (э. д. с.) источника электрической энергии идет на покрытие внутренних и внешних потерь напряжения в цепи.

Если обозначить E — электродвижущую силу в вольтах, I — ток в амперах, r — сопротивление внешней части цепи в омах, r_0 — сопротивление внутренней части цепи в омах, U_0 — внутреннее падение напряжения и U — внешнее падение напряжения цепи, то получим, что

$$E = U_0 + U = Ir_0 + Ir = I(r_0 + r),$$

$$I = \frac{E}{r_0 + r}.$$

Это и есть формула закона Ома для всей цепи. Словами она читается так: *ток в электрической цепи равен электродвижущей силе, деленной на сопротивление всей цепи (сумму внутреннего и внешнего сопротивлений).*

Пример 17. Электродвижущая сила E элемента равна 1,5 *в*, его внутреннее сопротивление $r_0 = 0{,}3$ *ом*. Элемент замкнут на сопротивление $r = 2{,}7$ *ом*. Определить ток в цепи.

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{1{,}5}{0{,}3 + 2{,}7} = 0{,}5 \text{ а}.$$

Пример 18. Определить э. д. с. элемента E, замкнутого на сопротивление $r = 2$ *ом*, если ток в цепи $I = 0{,}6$ *а*. Внутреннее сопротивление элемента $r_0 = 0{,}5$ *ом*.

Вольтметр, включенный на зажимы элемента, покажет напряжение на них, равное напряжению сети или падению напряжения во внешней цепи.

$$U = I \cdot r = 0{,}6 \cdot 2 = 1{,}2 \text{ в}.$$

Следовательно, часть э. д. с. элемента идет на покрытие внутренних потерь, а остальная часть — 1,2 *в* отдается в сеть.

Внутреннее падение напряжения

$$U_0 = I \cdot r_0 = 0{,}6 \cdot 0{,}5 = 0{,}3 \text{ в}.$$

Так как $E = U_0 + U$, то

$$E = 0{,}3 + 1{,}2 = 1{,}5 \text{ в}.$$

Тот же ответ можно получить, если воспользоваться формулой закона Ома для всей цепи:

$$I = \frac{E}{r_0 + r},$$

откуда

$$E = I(r_0 + r) = 0{,}6\,(0{,}5 + 2) = 1{,}5 \text{ в}.$$

Вольтметр, включенный на зажимы любого источника э. д. с. во время его работы, показывает напряжение на них или напряжение сети. При размыкании электрической цепи ток по ней проходить не будет. Ток не будет проходить также и внутри источника э. д. с., а следовательно, не будет и внутреннего падения напряжения. Поэтому вольтметр при разомкнутой цепи покажет э. д. с. источника электрической энергии.

Таким образом, вольтметр, включенный на зажимы источника э. д. с. показывает:

а) при замкнутой электрической цепи — напряжение сети;

б) при разомкнутой электрической цепи — э. д. с. источника электрической энергии.

Пример 19. Электродвижущая сила элемента 1,8 *в*. Он замкнут на сопротивление $r = 2{,}7$ *ом*. Ток в цепи равен 0,5 *а*. Определить внутреннее сопротивление r_0 элемента и внутреннее падение напряжения U_0.

$$r_0 + r = \frac{E}{I} = \frac{1{,}8}{0{,}5} = 3{,}6 \text{ ом}.$$

Так как $r = 2{,}7$ *ом*, то

$$r_0 = 3{,}6 - 2{,}7 = 0{,}9 \text{ ом};$$

$$U_0 = I \cdot r_0 = 0{,}5 \cdot 0{,}9 = 0{,}45 \text{ в}.$$

Из решенных примеров видно, что показание вольтметра, включенного на зажимы источника э. д. с., не остается постоянным при различных условиях работы электрической цепи. При увеличении тока в цепи увеличивается также внутреннее падение напряжения. Поэтому при неизменной э. д. с. на долю внешней сети будет приходиться все меньшее и меньшее напряжение.

В табл. 5 показано, как меняется напряжение электрической цепи (U) в зависимости от изменения внешнего сопротивления (r) при неизменных э. д. с. (E) и внутреннем сопротивлении (r_0) источника энергии.

Таблица 5

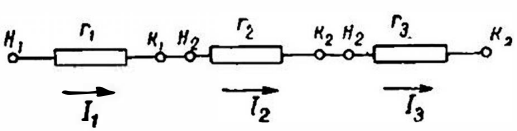
Зависимость напряжения цепи от сопротивления r при неизменных э. д. с. и внутреннем сопротивлении r_0

E	r_0	r	$I=\frac{E}{r_0+r}$	$U_0=I\cdot r_0$	$U=I\cdot r$
2	0,5	2	0,8	0,4	1,6
2	0,5	1	1,33	0,67	1,33
2	0,5	0,5	2	1	1

§ 22. Соединение проводников между собой. Первый закон Кирхгофа

Отдельные проводники электрической цепи могут быть соединены между собой последовательно, параллельно и смешанно.

Последовательным соединением проводников называется такое соединение, когда конец первого проводника соединен с началом второго, конец второго проводника соединен с началом третьего и т. д. (фиг. 31).



Фиг. 31. Последовательное соединение проводников

Общее сопротивление цепи, состоящее из нескольких последовательно соединенных проводников, равно сумме сопротивлений отдельных проводников:

$$r = r_1 + r_2 + r_3 + \cdots + r_n.$$

Ток на отдельных участках последовательной цепи везде одинаков:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I.$$

Пример 20. На фиг. 32 представлена электрическая цепь, состоящая из трех последовательно включенных сопротивлений $r_1 = 2$ *ом*, $r_2 = 3$ *ом*, $r_3 = 5$ *ом*. Требуется определить показания вольтметров V_1, V_2, V_3 и V_4, если ток в цепи равен 4 *а*.

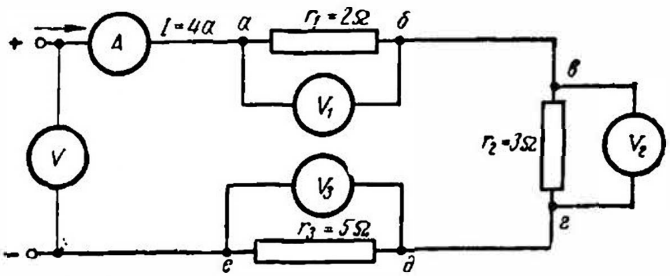
Сопротивление всей цепи

$$r = r_1 + r_2 + r_3 = 2 + 3 + 5 = 10 \text{ ом}.$$

По закону Ома напряжение на зажимах цепи равно току цепи, умноженному на ее сопротивление:

$$U = I \cdot r = 4 \cdot 10 = 40 \text{ в}.$$

Следовательно, вольтметр V, присоединенный к зажимам источника напряжения, покажет напряжение 40 *в*.



Фиг. 32. Схема измерения напряжений на отдельных участках электрической цепи

В сопротивлении r_1 при протекании тока будет падение напряжения:

$$U_1 = I \cdot r_1 = 4 \cdot 2 = 8 \text{ в}.$$

Вольтметр V_1, включенный между точками *а* и *б*, покажет 8 *в*.

В сопротивлении r_2 также происходит падение напряжения:

$$U_2 = I \cdot r_2 = 4 \cdot 3 = 12 \text{ в}.$$

Вольтметр V_2, включенный между точками *в* и *г*, покажет 12 *в*.

Падение напряжения в сопротивлении r_3:

$$U_3 = I \cdot r_3 = 4 \cdot 5 = 20 \text{ в}.$$

Вольтметр V_3, включенный между точками *д* и *е*, покажет 20 *в*.

Если вольтметр присоединить одним концом к точке *а*, другим концом к точке *г*, то он покажет разность потенциалов между этими точками, равную сумме падений напряжения в сопротивлениях r_1 и r_2 (8 + 12 = 20 *в*).

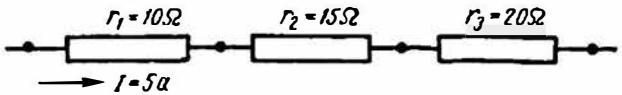
Таким образом, вольтметр V, измеряющий напряжение на зажимах цепи и включенный между точками *а* и *е*, покажет разность потенциалов между этими точками или сумму падений напряжения в сопротивлениях r_1, r_2 и r_3.

Отсюда видно, что сумма падений напряжения на отдельных участках электрической цепи равна напряжению на зажимах цепи.

Так как при последовательном соединении ток цепи на всех участках одинаков, то падение напряжения пропорционально сопротивлению данного участка.

Пример 21. Три сопротивления 10, 15 и 20 *ом* соединены последовательно, как показано на фиг. 33. Ток в цепи 5 *а*. Определить падение напряжения на каждом сопротивлении.

$$U_1 = I \cdot r_1 = 5 \cdot 10 = 50 \text{ в},$$
$$U_2 = I \cdot r_2 = 5 \cdot 15 = 75 \text{ в},$$
$$U_3 = I \cdot r_3 = 5 \cdot 20 = 100 \text{ в}.$$

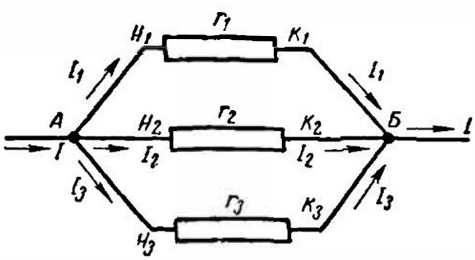


Фиг. 33. К примеру 21

Общее напряжение цепи равно сумме падений напряжения на отдельных участках цепи:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 50 + 75 + 100 = 225 \text{ в}.$$

Параллельным соединением проводников называется такое соединение, когда начала всех проводников соединены в одну точку, а концы проводников — в другую точку (фиг. 34). Начало цепи присоединяется к одному полюсу источника напряжения, а конец цепи — к другому полюсу.



Фиг. 34. Параллельное соединение проводников

Из фигуры видно, что при параллельном соединении проводников для прохождения тока имеется несколько путей. Ток, протекая к точке разветвления *A*, растекается далее по трем сопротивлениям и равен сумме токов, уходящих от этой точки:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Если токи, приходящие к точке разветвления, считать положительными, а уходящие — отрицательными, то для точки разветвления можно написать:

$$\sum_{k=1}^{k=n} I_k = 0,$$

т. е. *алгебраическая сумма токов для любой узловой точки цепи всегда равна нулю. Это соотношение, связывающее токи в любой точке разветвления цепи, называется первым законом Кирхгофа.* Обычно при расчете электрических цепей направления токов в ветвях, присоединениых к какой-либо точке разветвления, неизвестны. Поэтому для возможности самой

записи уравнения первого закона Кирхгофа нужно перед началом расчета цепи произвольно выбрать так называемые положительные направления токов во всех ее ветвях и обозначить их стрелками на схеме.

Пользуясь законом Ома, можно вывести формулу для подсчета общего сопротивления при параллельном соединении потребителей.

Общий ток, приходящий к точке A, равен:

$$I = \frac{U}{r}.$$

Токи в каждой из ветвей имеют значения:

$$I_1 = \frac{U}{r_1};\quad I_2 = \frac{U}{r_2};\quad I_3 = \frac{U}{r_3}.$$

По первому закону Кирхгофа

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

или

$$\frac{U}{r} = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2} + \frac{U}{r_3}.$$

Вынося U в правой части равенства за скобки, получим:

$$\frac{U}{r} = U\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}\right).$$

Сокращая обе части равенства на U, получим формулу подсчета общей проводимости:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}$$

или

$$g = g_1 + g_2 + g_3.$$

Таким образом, при параллельном соединении увеличивается не сопротивление, а проводимость.

Пример 22. Определить общее сопротивление трех параллельно включенных сопротивлений, если $r_1 = 2$ ом, $r_2 = 3$ ом, $r_3 = 4$ ом.

$$g = g_1 + g_2 + g_3 = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} = \frac{6+4+3}{12} = \frac{13}{12}\ \frac{1}{ом},$$

откуда

$$r = \frac{12}{13} = 0{,}92\ ом.$$

Пример 23. Пять сопротивлений 20, 30, 15, 40 и 60 ом включены параллельно в сеть. Определить общее сопротивление:

$$g = g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5 = \frac{1}{20} + \frac{1}{30} + \frac{1}{15} + \frac{1}{40} + \frac{1}{60} =$$

$$\frac{6+4+8+3+2}{120} = \frac{23}{120}\ \frac{1}{ом},$$

откуда

$$r = \frac{120}{23} = 5{,}2 \text{ ом}.$$

Следует заметить, что при подсчете общего сопротивления разветвления оно получается всегда меньше, чем самое меньшее сопротивление, входящее в разветвление.

Если сопротивления, включенные параллельно, равны между собой, то общее сопротивление r цепи равно сопротивлению одной ветви r_1, деленному на число ветвей n:

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

Пример 24. Определить общее сопротивление четырех параллельно включенных сопротивлений по 20 ом каждое:

$$r = \frac{r_1}{n} = \frac{20}{4} = 5 \text{ ом}.$$

Для проверки попробуем найти сопротивление разветвления по формуле:

$$g = g_1 + g_2 + g_3 + g_4 = \frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20} + \frac{1}{20} = \frac{4}{20} \frac{1}{\text{ом}},$$

откуда

$$r = \frac{20}{4} = 5 \text{ ом}.$$

Как видим, ответ получается тот же.

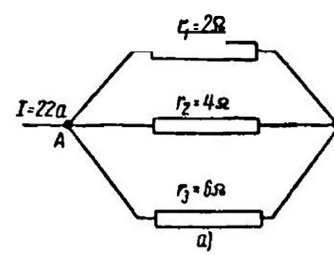
Пример 25. Пусть требуется определить токи в каждой ветви при параллельном их соединении, изображенном на фиг. 35, *а*.

Найдем общее сопротивление цепи:

$$g = g_1 + g_2 + g_3 = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6} = \frac{6+3+2}{12} = \frac{11}{12} \frac{1}{\text{ом}},$$

откуда

$$r = \frac{12}{11} = 1{,}09 \text{ ом}.$$



Фиг. 35. К примеру 25

Теперь все разветвление мы можем изобразить упрощенно как одно сопротивление (фиг. 35, *б*).

Падение напряжения на участке между точками A и $Б$ будет:

$$U = I \cdot r = 22 \cdot 1{,}09 = 24 \text{ в}.$$

Возвращаясь снова к фиг. 35, *а*, видим, что все три сопротивления окажутся под напряжением 24 *в*, так как они включены между точками A и $Б$.

Рассматривая первую ветвь разветвления с сопротивлением r_1, мы видим, что напряжение на этом участке 24 *в*, сопротивление участка 2 *ом*. По закону Ома для участка цепи ток на этом участке будет:

$$I_1 = \frac{U}{r_1} = \frac{24}{2} = 12 \text{ а}.$$

Ток второй ветви

$$I_2 = \frac{U}{r_2} = \frac{24}{4} = 6\ a.$$

Ток третьей ветви

$$I_3 = \frac{U}{r_3} = \frac{24}{6} = 4\ a.$$

Проверим по первому закону Кирхгофа

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = 12 + 6 + 4 = 22\ a.$$

Следовательно, задача решена верно.

Обратим внимание на то, как распределяются токи в ветвях нашего параллельного соединения.

Первая ветвь: $r_1 = 2\ ом$, $I_1 = 12\ a$.

Вторая ветвь: $r_2 = 4\ ом$, $I_2 = 6\ a$.

Третья ветвь: $r_3 = 6\ ом$, $I_3 = 4\ a$.

Как видим, сопротивление первой ветви в два раза меньше сопротивления второй ветви, а ток первой ветви в два раза больше тока второй ветви. Сопротивление третьей ветви в три раза больше сопротивления первой ветви, а ток третьей ветви в три раза меньше тока первой ветви. Отсюда можно сделать вывод, что токи в ветвях при параллельном соединении распределяются обратно пропорционально сопротивлениям этих ветвей. Таким образом, по ветви с большим сопротивлением потечет ток меньший, чем по ветви с малым сопротивлением.

Для двух параллельных ветвей можно также, конечно, пользоваться данной выше формулой.

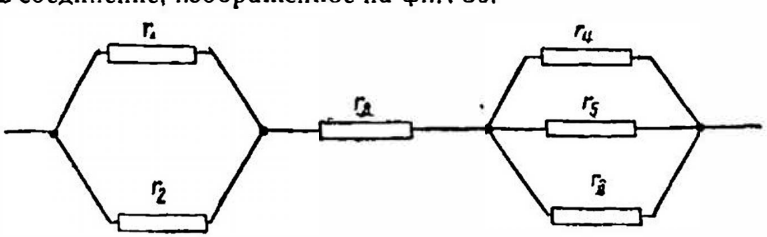
Однако общее сопротивление в этом случае легче подсчитать по формуле:

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

или окончательно:

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

Смешанным соединением проводников называется такое соединение, где имеются и последовательное и параллельное соединения отдельных проводников. Примером может служить соединение, изображенное на фиг. 36.



Фиг. 36 Смешанное соединение проводников

Пример 26. Определить общее сопротивление смешанного соединения, представленного на фиг. 36, если

$$r_1 = 2\ ом,\ r_2 = 3\ ом,\ r_3 = 5\ ом,\ r_4 = 4\ ом,$$
$$r_5 = 8\ ом\ и\ r_6 = 6\ ом.$$

Находим общее сопротивление первого разветвления:

$$g_{1,2} = g_1 + g_2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} = \frac{3+2}{6} = \frac{5}{6}\ \frac{1}{ом},$$

откуда

$$r_{1,2} = \frac{6}{5} = 1{,}2\ ом.$$

Общее сопротивление второго разветвления:

$$g_{4,5,6} = g_4 + g_5 + g_6 = \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{6} = \frac{6+3+4}{24} = \frac{13}{24}\ \frac{1}{ом},$$

откуда

$$r_{4,5,6} = \frac{24}{13} = 1{,}85\ ом.$$

Общее сопротивление цепи:

$$r = r_{1,2} + r_3 + r_{4,5,6} = 1{,}2 + 5 + 1{,}85 = 8{,}05\ ом.$$

§ 23. Работа и мощность электрического тока

К цепи, представленной на фиг. 37, приложено постоянное напряжение U.

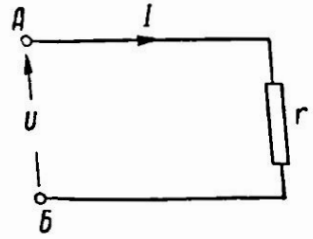
$$U = \varphi_A - \varphi_Б$$

За время t по цепи протекло количество электричества Q. Силы электрического поля, действующего вдоль проводника, перенесли за это время заряд Q из точки A в точку $Б$. Работа электрических сил поля или, что то же, работа электрического тока может быть подсчитана по формуле:

$$A = Q(\varphi_1 - \varphi_Б) = Q \cdot U,$$

так как $Q = It$, то окончательно:

$$A = UIt,$$



Фиг. 37. Работа и мощность электрического тока

где A — работа в джоулях;
I — ток в амперах;
t — время в секундах;
U — напряжение в вольтах.

По закону Ома $U = I \cdot r$. Поэтому формулу работы можно написать и так:

$$A = I^2 rt.$$

Работа, произведенная в единицу времени, называется мощностью и обозначается буквой P.

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

Из этой формулы имеем:

$$A = Pt.$$

Единица мощности:

$$\frac{\text{джоуль}}{1\ \text{секунду}} = 1\ \frac{дж}{сек} = 1\ вт.$$

$1\ \frac{дж}{сек}$ иначе называется ваттом (*вт*). Подставляя в формулу мощности выражение для работы электрического тока, имеем:

$$P = \frac{UIt}{t} = UI;$$

$$P = UI\ вт$$

или

$$P = \frac{I^2rt}{t} = I^2r;\ P = I^2r\ вт.$$

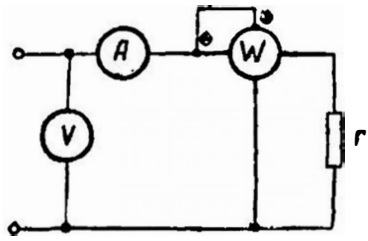
Кроме ватта, применяются более крупные единицы мощности:

100 *вт* = 1 гектоватт (*гвт*).

1 000 *вт* = 1 киловатт (*квт*).

1 000 000 *вт* = 1 мегаватт (*мгвт*).

Электрическая мощность измеряется ваттметром. Ваттметр имеет две обмотки: последовательную и параллельную. Схема включения ваттметра показана на фиг. 38.



Фиг. 38. Схема включения ваттметра

Из формулы $P = IU$ видно, что мощность, потребляемую в сети, можно определить, умножив ток на напряжение. Поэтому для определения мощности, потребляемой сетью, следует показание амперметра умножить на показание вольтметра.

Так, например, мощность, потребляемая в цепи, при показании амперметра 3 *а* и вольтметра 120 *в* будет:

$$P = IU = 3 \cdot 120 = 360\ вт.$$

Для практических измерений электрической работы (энергии) джоуль является слишком мелкой единицей.

Если время t подставлять не в секундах, а в часах, то получим более крупные единицы электрической энергии:

1 *дж* = 1 *вт · сек.*

1 *вт · ч* = 3600 ватт-секунд = 3600 *дж.*

100 *вт · ч* = 1 гектоватт-час (*гвт · ч*).

1000 *вт · ч* = 1 киловатт-час (*квт · ч*).

Электрическая энергия измеряется счетчиками электрической энергии.

Пример 27. Определить мощность, потребляемую электрическим двигателем, если ток в цепи равен 8 *а* и двигатель включен в сеть напряжением 220 *в*.

$$P = I\,U = 8 \cdot 220 = 1760 \text{ вт} = 17{,}6 \text{ гвт} = 1{,}76 \text{ квт}.$$

Пример 28. Какова мощность, потребляемая электрической плиткой, если плитка берет из сети ток в 5 *а*, а сопротивление спирали плитки равно 24 *ом*?

$$P = I^2 r = 25 \cdot 24 = 600 \text{ вт} = 6 \text{ гвт} = 0{,}6 \text{ квт}.$$

При переводе механической мощности в электрическую и обратно необходимо помнить, что

1 лошадиная сила (*л. с.*) = 736 *вт.*

1 киловатт (*квт*) = 1,36 *л. с.*

Пример 29. Определить энергию, расходуемую электрической плиткой мощностью 600 *вт* в течение 5 час.

$$A = P \cdot t = 600 \cdot 5 = 3000 \text{ вт} \cdot \text{ч} = 30 \text{ гвт} \cdot \text{ч} = 3 \text{ квт} \cdot \text{ч}$$

Пример 30. Определить стоимость горения двенадцати электрических ламп в течение месяца (30 дней), если четыре из них по 60 *вт* горят по 6 час. в сутки, а остальные восемь ламп по 25 *вт* горят по 4 часа в сутки. Цена за энергию (тариф) 0,4 коп. за 1 *гвт . ч*

Мощность четырех ламп по 60 *вт.*

$$P = 60 \cdot 4 = 240 \text{ вт}.$$

Число часов горения этих ламп в месяц:

$$t = 6 \cdot 30 = 180 \text{ час}.$$

Энергия, расходуемая этими лампами:

$$A = P \cdot t = 240 \cdot 180 = 43\,200 \text{ вт} \cdot \text{ч} = 432 \text{ гвт} \cdot \text{ч}$$

Мощность остальных восьми ламп по 25 *вт:*

$$25 \cdot 8 = 200 \text{ вт}.$$

Число часов горения этих ламп в месяц:

$$4 \cdot 30 = 120 \text{ час}.$$

Энергия, расходуемая этими лампами:

$$A = P \cdot t = 200 \cdot 120 = 24\,000 \text{ вт} \cdot \text{ч} = 240 \text{ гвт} \cdot \text{ч}$$

Общее количество расходуемой энергии.

$$432 + 240 = 672 \text{ гвт} \cdot \text{ч}$$

Стоимость всей энергии:

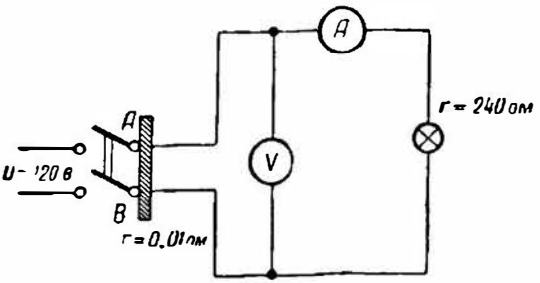
$$672 \cdot 0{,}4 = 268{,}8 \text{ коп.} \approx 2 \text{ р. } 69 \text{ к.}$$

§ 24. Короткое замыкание

На фиг. 39 показана схема включения электрической лампы накаливания в электрическую сеть. Если сопротивление этой лампы $r_л = 240$ *ом*, а напряжение сети $U = 120$ *в*, то ток в цепи лампы будет:

$$I = \frac{U}{r_л} = \frac{120}{240} = 0{,}5 \text{ а}.$$

Разберем случай, когда провода, идущие к лампе накаливания, оказались замкнутыми через очень малое сопротивление,



Фиг 39. Короткое замыкание на зажимах рубильника

например толстый металлический стержень, случайно попавший на два провода. В этом случае ток сети, подходя к точке A, будет разветвляться по двум путям: одна, бо́льшая его часть, пойдет по металлическому стержню — пути с малым сопротивлением, а другая, небольшая часть тока, будет проходить по пути с большим сопротивлением — лампе накаливания.

Определим ток, текущий по металлическому стержню с сопротивлением $r = 0{,}01$ *ом*.

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{0{,}01} = 12\,000 \text{ а}.$$

На самом деле в случае короткого замыкания напряжение сети будет меньше 120 *в*, так как большой ток создаст в сети большое падение напряжения и поэтому ток, протекающий по металлическому стержню, будет также меньше 12 000 *а*. Но все же этот ток будет во много раз превышать ток, потреблявшийся ранее лампой накаливания.

Ток, проходя по проводнику, выделяет тепло, и проводник нагревается. В нашем примере сечение проводов электрической цепи было рассчитано на небольшой ток — 0,5 *а*. При замыкании проводов по цепи будет протекать очень большой ток — 12 000 *а*. Такой ток вызовет выделение громадного количества тепла, что приведет к обугливанию и сгоранию изоляции про-

водов, расплавлению материала проводов, порче электроизмерительных приборов, оплавлению контактов выключателей, ножей рубильников и т. д. Источник электрической энергии, питающий такую цепь, также может быть поврежден. Перегрев проводов может вызвать пожар.

Каждая электрическая сеть рассчитывается на свой, нормальный для нее ток.

Аварийный режим работы сети, когда вследствие уменьшения ее сопротивления ток в ней резко увеличивается против нормального, называется коротким замыканием.

Ввиду опасных, разрушительных, а иногда и непоправимых последствий короткого замыкания необходимо соблюдать определенные условия при монтаже и эксплуатации электрических установок. Основные из них следующие:

1) изоляция проводов должна соответствовать своему назначению (напряжению сети и условиям ее работы);

2) сечение проводов должно быть таково, чтобы нагревание их при существующих условиях работы не достигало опасной величины;

3) проложенные провода должны быть надежно защищены от механических повреждений;

4) провода должны быть проложены на изоляторах или роликах, обладающих достаточной механической и электрической прочностью;

5) места соединений и ответвлений должны быть так же надежно изолированы, как и самые провода;

6) скрещивание проводов должно быть выполнено так, чтобы провода не касались друг друга;

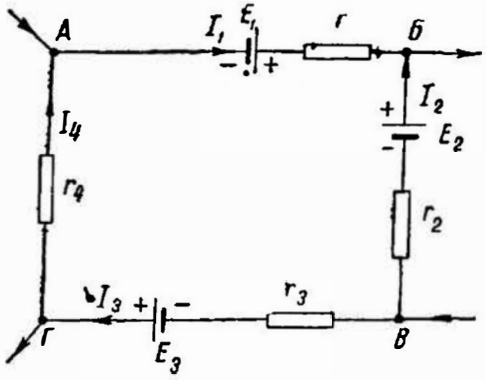
7) через стены, потолки и полы провода должны быть проложены так, чтобы они были защищены от сырости, механических и химических повреждений и хорошо изолированы.

Чтобы избежать внезапного, опасного увеличения тока в электрической цепи при ее коротком замыкании, цепь защищают плавкими предохранителями. Они представляют собой легкоплавкую проволочку, включенную последовательно в сеть. При увеличении тока сверх определенной величины проволочка предохранителя нагревается и плавится, в результате чего электрическая цепь автоматически разрывается и ток в ней прекращается. Более детально предохранители будут описаны ниже, в § 54.

§ 25. Второй закон Кирхгофа. Применение законов Кирхгофа для расчета электрических цепей

При расчете электрических цепей нам часто приходится встречаться с цепями, которые образуют замкнутые контуры. В состав таких контуров, помимо сопротивлений, могут входить еще электродвижущие силы. На фиг. 40 представлен участок

сложной электрической цепи. Задана полярность всех э. д. с. Произвольно выбираем положительные направления токов. Обходим контур от точки A в произвольном направлении, например по часовой стрелке. Рассмотрим участок $АБ$. На этом участке происходит падение потенциала (ток идет от точки с высшим потенциалом к точке с низшим потенциалом).



Фиг. 40. Участок сложной электрической цепи

На участке $АБ$:

$$\varphi_A + E_1 - I_1 r_1 = \varphi_Б .$$

На участке $БВ$:

$$\varphi_Б - E_2 - I_2 r_2 = \varphi_B .$$

На участке $ВГ$:

$$\varphi_B - I_3 r_3 + E_3 = \varphi_Г .$$

На участке $ГА$:

$$\varphi_Г - I_4 r_4 = \varphi_A .$$

Складывая почленно четыре приведенных уравнения, получим:

$$\varphi_A + E_1 - I_1 r_1 + \varphi_Б - E_2 - I_2 r_2 + \varphi_B - I_3 r_3 + E_3 + \\ + \varphi_Г - I_4 r_4 - \varphi_Б + \varphi_B + \varphi_Г + \varphi_A \text{ или}$$

$$E_1 - I_1 r_1 - E_2 - I_2 r_2 - I_3 r_3 + E_3 - I_4 r_4 = 0.$$

Перенеся произведения $I \cdot r$ в правую часть, получим:

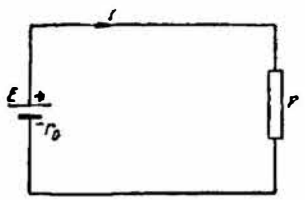
$$E_1 - E_2 + E_3 = I_1 r_1 + I_2 r_2 + I_3 r_3 + I_4 r_4 .$$

В общем виде

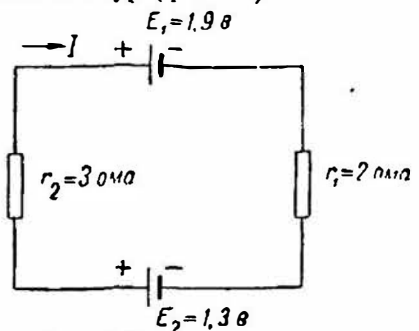
$$\sum E = \sum Ir .$$

Это выражение представляет собой второй закон Кирхгофа. Формула показывает, что *во всяком замкнутом контуре алгебраическая сумма электродвижущих сил равна алгебраической сумме падений напряжений.*

Рассмотрим простой замкнутый контур (фиг. 41).



Фиг. 41. Простой замкнутый контур



Фиг. 42. Электрическая цепь — к примеру 31

По второму закону Кирхгофа

$$\sum E = \sum Ir;$$

откуда

$$E = Ir_0 + Ir = I(r_0 + r),$$

откуда

$$I = \frac{E}{r_0 + r}.$$

Мы получили формулу закона Ома для всей цепи.

Решим несколько задач, используя закон Ома и оба закона Кирхгофа.

Пример 31. Дана электрическая цепь (фиг. 42). Найти ее ток. Выберем произвольно положительное направление тока. Обходя контур по часовой стрелке, пишем уравнение второго закона Кирхгофа:

$$-E_1 + E_2 = I \cdot r_1 + I \cdot r_2; \quad -1,9 + 1,3 = I(2 + 3); \quad -0,6 = 5I; \quad I = -0,12$$

Знак минус означает, что выбранное нами направление тока противоположно его действительному направлению.

Пример 32. Дана электрическая цепь (фиг. 43). Определить токи на отдельных участках.

Произвольно выбираем положительные направления токов.

Для контура *абде:*

$$6 = 2I_1 + 5I_3. \tag{1}$$

Для контура *авге:*

$$6 - 2 = 2I_1 - 4I_2; \quad 2I_1 - 2I_2. \tag{2}$$

Для точки *б* по первому закону Кирхгофа:

$$I_3 = I_1 + I_2. \tag{3}$$

Имеем три уравнения с тремя неизвестными. Решая их, находим величину и направление токов. Подставляя значение тока I_3 из уравнения (3) в уравнение (1), получим:

$$6 = 2I_1 + 5I_1 + 5I_2;$$

$$6 = 7I_1 + 5I_2$$

$$+$$

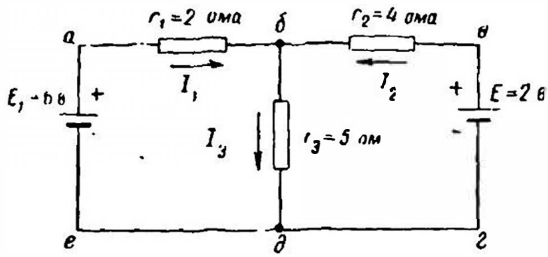
$$2 = I_1 - 2I_2$$

или

$$12 = 14I_1 + 10I_2$$

$$+$$

$$10 = 5I_1 - 10I_2.$$



Фиг. 43. Электрическая цепь — к примеру 32

Складывая два последних уравнения, имеем:

$$22 = 19I_1, \quad \text{откуда} \quad I_1 = 1{,}156 \text{ а},$$

подставляем значение I_1 в уравнение (1):

$$6 = 2 \cdot 1{,}156 + 5I_2,$$

$$I_3 = \frac{6 - 2 \cdot 1{,}156}{5} = 0{,}74 \text{ а}.$$

Подставляем значение I_1 в уравнение (2):

$$2 = 1{,}56 - 2I_2,$$

откуда

$$I_2 = \frac{-2 + 1{,}156}{2} = -0{,}422 \text{ а}.$$

Знак минус показывает, что действительное направление тока I_2 обратно принятому нами направлению.

§ 26. Метод наложения

Метод наложения применяется для расчета электрических цепей, имеющих несколько э. д. с. Сущность метода наложения состоит в том, что ток в какой-либо части цепи можно считать состоящим из ряда частичных токов, вызванных каждой отдельной э. д. с., причем остальные э. д. с. принимаются равными нулю.

Рассмотрим пример.

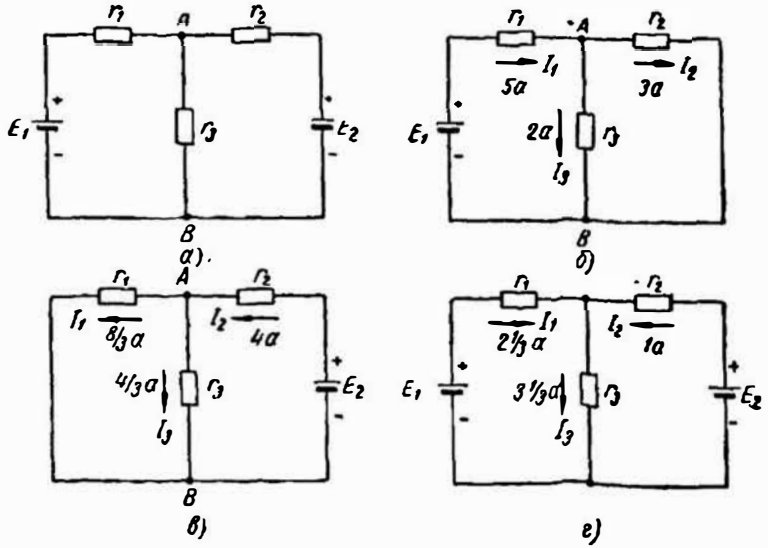
Пример 33 (фиг. 44, *а*). Дано $E_1 = 27$ *в*, $E_2 = 24$ *в*, $r_1 = 3$ *ом*, $r_2 = 4$ *ом*, $r_3 = 6$ *ом*. Определить, как распределяются токи в цепи.

Найдем токи, созданные э. д. с. E_1 (э. д. с. E_2 принята равной нулю) (фиг. 44, *б*). Выберем положительные направления токов, определим сопротивление участков цепи и токи на каждом участке. Сопротивление r_2 и r_3 соединены параллельно. Поэтому сопротивление разветвления:

$$r_{2,3} = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3} = \frac{4 \cdot 6}{4 + 6} = 2{,}4 \text{ ом}.$$

Полное сопротивление цепи:

$$r = r_1 + r_{2,3} = 3 + 2{,}4 = 5{,}4 \text{ ом}.$$



Фиг. 44. Метод наложения — к примеру 33

Ток на общем участке цепи:

$$I_1 = \frac{E_1}{r} = \frac{27}{5{,}4} + 5 \text{ а}.$$

Напряжение между точками A и B.

$$U_{AB} = E_1 - I_1 r_1 = 27 - 5 \cdot 3 = 12 \text{ в}.$$

Токи в параллельных ветвях:

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{r_2} = \frac{12}{4} = 3 \text{ а};$$

$$I_3 = \frac{U_{AB}}{r_3} = \frac{12}{6} = 2 \text{ а}.$$

Проверка.

$$I_2 + I_3 = 3 + 2 = 5 \text{ а} = I_1.$$

Найдем токи, созданные э. д. с. E_2 (э. д. с. E_1 принята равной нулю) (фиг. 44, *в*). Выберем положительные направления токов, определим сопротивления участков цепи и токи на каждом участке.

$$r_{1,3} = \frac{r_1 r_3}{r_1 + r_3} = \frac{3 \cdot 6}{3 + 6} = 2 \text{ ом};$$

$$r = r_2 + r_{1,3} = 4 + 2 = 6 \text{ ом},$$

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{r} = \frac{24}{6} = 4 \text{ а};$$

$$U_{AB} = E_2 - I_2 r_2 = 24 - 4 \cdot 4 = 8 \text{ в};$$

$$I_1 = \frac{U_{AB}}{r_1} = \frac{8}{3} \text{ а};$$

$$I_3 = \frac{U_{AB}}{r_3} = \frac{8}{6} = \frac{4}{3} \text{ а}.$$

Проверка.

$$I_1 + I_3 = \frac{8}{3} + \frac{4}{3} = \frac{12}{3} = 4 \text{ а} = I_2.$$

Сравнивая две последние схемы (фиг. 44, *б* и *в*), видим, что на каждом участке (в каждой ветви) цепи протекают два тока. Произведя алгебраическое сложение этих токов (табл. 6), получим действительный ток данного участка.

Таблица 6

Ток участка	Фиг. 44, *б*	Фиг. 44, *в*	Действительный ток и его направление
I_1	Вправо, 5 *а*	Влево, $^8/_3$ *а*	Вправо, $^7/_3$ *а*
I_2	Вправо, 3 *а*	Влево, 4 *а*	Влево, 1 *а*
I_3	Вниз, 2 *а*	Вниз, $^4/_3$ *а*	Вниз, $^{10}/_3$ *а*

Проверка.
По первому закону Кирхгофа для точки A имеем:

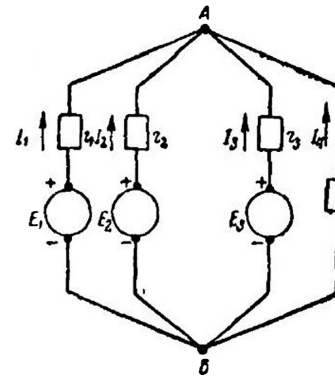
$$I_1 + I_2 + I_3 = \frac{7}{3} + 1 - \frac{10}{3} = 0.$$

Токораспределение по схеме, представленной на фиг. 44, *а*, дано на фиг. 44, *г*.

§ 27. Метод узлового напряжения

В практических задачах встречаются цепи, имеющие всего две узловые точки. Между узловыми точками может быть включено произвольное количество ветвей. Расчет таких цепей значительно упрощается, если пользоваться методом узлового напряжения.

Рассмотрим сущность этого метода. На фиг. 45 изображена разветвленная электрическая цепь с двумя узловыми точками *А* и *Б*, между которыми включены четыре параллельные ветви. Три первые ветви имеют источники э. д. с. (генераторы) с э. д. с. E_1, E_2 и E_3. Последовательно с генераторами в этих ветвях включены сопротивления r_1, r_2 и r_3 (к ним могут быть отнесены и внутренние сопротивления самих генераторов). В последней ветви включено сопротивление r_4. Положительные направления токов в каждой ветви выбраны от точки *Б* к точке *А*. Поскольку в первых трех ветвях направление тока совпало с направлением э. д. с. источников электрической энергии, то последние работают в режиме генераторов. Если напряжение между узловыми точками *А* и *Б* обозначить *U*, то ток в первой ветви:



Фиг. 45. Метод узлового напряжения

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{r_1} = (E_1 - U) g_1,$$

т. е.

$$I_1 = (E_1 - U) g_1;$$

аналогично для остальных ветвей:

$$I_2 = (E_2 - U) g_2;$$
$$I_3 = (E_3 - U) g_3;$$
$$I_4 = (0 - U) g_4 = - U g_4.$$

Применяя для узловой точки *А* первый закон Кирхгофа, будем иметь:

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0.$$

Заменив токи их выражениями, последнее уравнение записываем так:

$$(E_1 - U) g_1 + (E_2 - U) g_2 + (E_3 - U) g_3 - U g_4 = 0,$$

откуда

$$U = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2 + E_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4}.$$

Мы получили формулу узлового напряжения.

В числителе формулы узлового напряжения представлена алгебраическая сумма произведений э. д. с. ветвей на проводимости этих ветвей. В знаменателе формулы дана сумма про-

водимостей всех ветвей. Если э. д. с. какой-либо ветви имеет направление, обратное тому, которое указано на фиг. 45, то она входит в формулу для узлового напряжения со знаком минус. В общем виде формулу для узлового напряжения можно записать так:

$$U = \frac{\Sigma Eg}{\Sigma g}.$$

Применяя формулу для узлового напряжения, решим следующий пример.

Пример 34. Для цепи, представленной на фиг. 45, даны э. д. с. генераторов $E_1 = 110$ *в*, $E_2 = 115$ *в*, $E_3 = 120$ *в*; внутренние сопротивления генераторов $r_{01} = 0{,}2$ *ом*, $r_{02} = 0{,}1$ *ом*, $r_{03} = 0{,}3$ *ом*. Сопротивление ветвей $r_1 = 2{,}3$ *ом*, $r_2 = 4{,}9$ *ом*, $r_3 = 4{,}7$ *ом*, $r_4 = 5$ *ом*. Определить токи в ветвях.

Решение.

Определяем проводимость каждой ветви:

$$g_1 = \frac{1}{r_{01} + r_1} = \frac{1}{0{,}2 + 2{,}3} = \frac{1}{2{,}5} = 0{,}4\ \frac{1}{ом};$$

$$g_2 = \frac{1}{r_{02} + r_2} = \frac{1}{0{,}1 + 4.9} = \frac{1}{5} = 0{,}2\ \frac{1}{ом};$$

$$g_3 = \frac{1}{r_{03} + r_3} = \frac{1}{0{,}3 + 4{,}7} = \frac{1}{5} = 0{,}2\ \frac{1}{ом}.$$

$$g_4 = \frac{1}{r_4} = \frac{1}{5} = 0{,}2\ \frac{1}{ом}.$$

Находим узловое напряжение:

$$U = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2 + E_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4} = \frac{110 \cdot 0{,}4 + 115 \cdot 0{,}2 + 120 \cdot 0{,}2}{0{,}4 + 0{,}2 + 0{,}2 + 0{,}2} = 91\ в.$$

Определяем токи в ветвях:

$$I_1 = (E_1 - U)\, g_1 = (110 - 91) \cdot 0.4 = 7{,}6\ а;$$

$$I_2 = (E_2 - U)\, g_2 = (115 - 91) \cdot 0{,}2 = 4{,}8\ а;$$

$$I_3 = (E_3 - U)\, g_3 = (120 - 91) \cdot 0{,}2 = 5{,}8\ а;$$

$$I_4 = -Ug_4 = -91 \cdot 0{,}2 = -18{,}2\ а.$$

Знак минус у тока I_4 показывает, что действительное направление тока обратно тому, которое показано на фиг. 45.

Рассмотрим работу двух генераторов параллельного возбуждения с одинаковыми э. д. с ($E_1 = E_2$) и одинаковыми внутренними сопротивлениями ($r_{01} = r_{02}$). Схема включения генераторов показана на фиг. 45. Пусть $E_1 = E_2 = 110$ *в*, $r_{01} = r_{02} = 0{,}2$ *ом*. Сопротивление потребителя $r_3 = 1$ *ом*. Определить мощность, развиваемую генераторами

Применяя формулу узлового напряжения, будем иметь:

$$U = \frac{E_1 g_1 + E_2 g_2}{g_1 + g_2 + g_3} = \frac{2 \cdot 110 \dfrac{1}{0{,}2}}{\dfrac{1}{0{,}2} + \dfrac{1}{0{,}2} + 1} = 100\ в.$$

Токи генераторов:

$$I_1 = (E_1 - U)\, g_1 = (110 - 100) \cdot \frac{1}{0{,}2} = 50\ a.$$

$$I_2 = 50\ a.$$

Мощности, создаваемые генераторами:

$$P_1 = E_1 I_1 = 110 \cdot 50 = 5500\ вт;$$

$$P_2 = 5500\ вт.$$

Приведенный пример показывает, что при одинаковых э. д. с. и одинаковых внутренних сопротивлениях генераторов мощности, отдаваемые каждым генератором в сеть, также одинаковы.

Пусть теперь э. д. с. второго генератора E_2 стала равной 121 *в*. Тогда узловое напряжение

$$U = \frac{110 \cdot \frac{1}{0{,}2} + 121\,\frac{1}{0{,}2}}{\frac{1}{0{,}2} + \frac{1}{0{,}2} + 1} = 105\ в.$$

Токи генераторов:

$$I_1 = (110 - 105)\frac{1}{0{,}2} = 25\ a;$$

$$I_2 = (121 - 105)\frac{1}{0{,}2} = 80\ a.$$

Ток потребителя

$$I_3 = \frac{105}{1} = 105\ a.$$

Мощности, создаваемые генераторами:

$$P_1 = 110 \cdot 25 = 2750\ вт;$$

$$P_2 = 121 \cdot 80 = 9680\ вт.$$

Следовательно, при параллельной работе генераторов постоянного тока с одинаковым внутренним сопротивлением более загруженным окажется тот генератор, э. д. с. которого больше.

Рассмотрим, наконец, случай, когда э. д. с. параллельно работающих генераторов одинаковы, но внутренние сопротивления их различны.

Пример 35. Дано: э. д. с. генераторов $E_1 = E_2 = 110$ *в*, внутренние сопротивления генераторов $r_{01} = 0{,}2$ *ом*, $r_{02} = 0{,}25$ *ом*, сопротивление внешней части цепи $r = 1$ *ом*. Определить токи генераторов.

Вычисляем узловое напряжение:

$$U = \frac{110\,\frac{1}{0{,}2} + 110\,\frac{1}{0{,}25}}{\frac{1}{0{,}2} + \frac{1}{0{,}25} + 1} = 99\ в.$$

Токи генераторов:

$$I_1 = (110 - 99)\frac{1}{0{,}2} = 55\ a;$$

$$I_2 = (110 - 99)\frac{1}{0{,}25} = 44\ a.$$

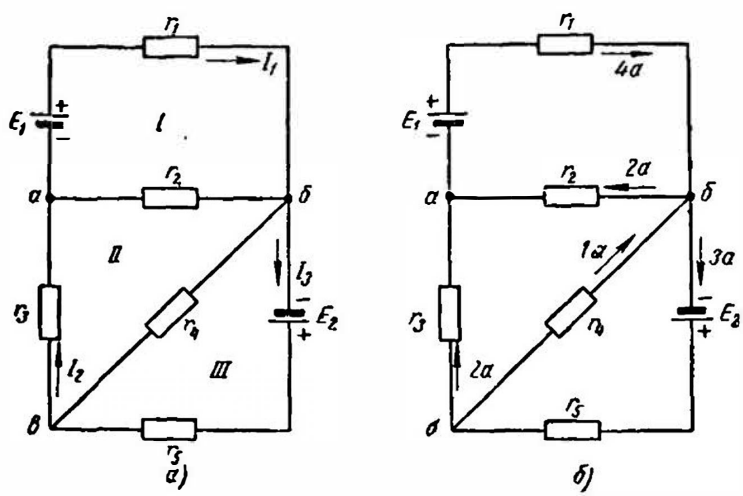
Ток нагрузки

$$I_3 = \frac{99}{1} = 99\ a.$$

При параллельной работе генераторов постоянного тока с одинаковыми э. д. с., но с различными внутренними сопротивлениями более загруженным окажется тот генератор, который имеет меньшее внутреннее сопротивление.

§ 28. Метод контурных токов

Метод контурных токов применяется для расчета сложных электрических цепей, имеющих больше двух узловых точек. На фиг. 46, *а* изображена такая электрическая цепь. В ней три кон-



Фиг. 46. Метод контурных токов

тура, причем средний контур имеет участки, входящие в состав двух соседних контуров, а также участки, которые входят в состав только одного контура.

Сущность метода контурных токов заключается в предположении, что в каждом контуре проходит свой ток (контурный ток). Тогда на общих участках, расположенных на границе двух соседних контуров, будет протекать ток, равный алгебраической сумме токов этих контуров.

Выберем положительные направления трех контурных токов так, как указано на чертеже стрелками. Затем составим уравнения по второму закону Кирхгофа, обходя все три контура в одном направлении, например в направлении движения часовой стрелки.

Для контура *I*:

$$E_1 = I_1 r_1 + (I_1 - I_2) r_2. \qquad \text{(а)}$$

Для контура *II*:

$$0 = I_2 r_3 + (I_2 - I_1) r_2 + (I_2 - I_3) r_4. \qquad \text{(б)}$$

Для контура *III*:

$$E_2 = I_3 r_5 + (I_3 - I_2) r_4. \qquad \text{(в)}$$

Как мы видим, число уравнений равно числу контуров, т. е. число уравнений меньше, чем при решении задачи по законам Кирхгофа. Решая систему уравнений, находим контурные токи, по которым определяются токи в ветвях.

Пример 36. Определить, как распределяются токи в цепи, представленной на фиг. 46, *а*, если $E_1 = 14$ *в*, $E_2 = 20$ *в*, $r_1 = 2$ *ом*, $r_2 = 3$ *ом*, $r_3 = 4$ *ом*, $r_4 = 2$ *ом*, $r_5 = 6$ *ом*.

Решение.

Уравнение для контура *I* по формуле (а):

$$\begin{gathered} 14 = I_1 2 + (I_1 - I_2) 3, \\ 14 = 2I_1 + 3I_1 - 3I_2, \\ 14 = 5I_1 - 3I_2 \end{gathered} \qquad \text{(а')}$$

Уравнение для контура *II* по формуле (б):

$$\begin{gathered} 0 = I_2 4 + (I_2 - I_1) 3 + (I_2 - I_3) 2, \\ 0 = 4I_2 + 3I_2 - 3I_1 + 2I_2 - 2I_3, \\ 0 = 9I_2 - 3I_1 - 2I_3. \end{gathered} \qquad \text{(б')}$$

Уравнение для контура *III*, по формуле (в):

$$\begin{gathered} 20 = 6I_3 + (I_3 - I_2) 2, \\ 20 = 6I_3 + 2I_3 - 2I_2, \\ 20 = 8I_3 - 2I_2, \\ 10 = 4I_3 - I_2 \end{gathered} \qquad \text{(в')}$$

Складывая выражения (а') и (б'), получим:

$$\begin{gathered} 14 = 5I_1 - 3I_2 \\ + \\ 0 = 9I_2 - 3I_1 - 2I_3 \end{gathered}$$

или

$$\begin{gathered} 42 = 15I_1 - 9I_2 \\ + \\ 0 = 45I_2 - 15I_1 - 10I_3 \\ \hline 42 = 36I_2 - 10I_3 \end{gathered} \qquad \text{(г)}$$

Складывая формулы (в′) и (г), получим:

$$\begin{array}{r} 10 = 4I_3 - I_2 \\ + \\ 42 = 36I_2 - 10I_3 \end{array}$$

или

$$\begin{array}{r} 50 = 20I_3 - 5I_2 \\ + \\ 84 = 72I_2 - 20I_3 \end{array}$$

$$134 = 67I_2, \text{ откуда } I_2 = \frac{134}{67} = 2\ a.$$

Подставляя значение тока I_2 в уравнение (в′), получим:

$$10 = 4I_3 - 2,$$
$$10 + 2 = 4I_3,$$

откуда

$$I_3 = \frac{12}{4} = 3\ a.$$

Подставляя значение тока I_2 в уравнение (а′), получим:

$$14 - 5I_1 - 6,$$
$$20 = 5I_1,$$

откуда

$$I_1 = \frac{20}{5} = 4\ a.$$

Таким образом, все контурные токи найдены.

Определяем токи на отдельных участках цепи алгебраически, складывая протекающие по ним контурные токи. Токораспределение на отдельных участках цепи показано на фиг 46, *б*.

§ 29. Металлические проводники

Согласно современным представлениям кристалл твердого или жидкого металла состоит из положительных ионов и свободных электронов. Ионы металла располагаются на одинаковых расстояниях один от другого и образуют правильную фигуру пространственной кристаллической решетки. Внутри решетки, подобно молекулам газа в воздухе, хаотически двигаются свободные электроны. В идеально правильной кристаллической решетке металла электроны двигались бы так же, как в пустоте. Однако включения посторонних примесей, искажающих решетку, а также тепловые движения атомов металла создают препятствия движению электронов. Часть электронов атомов металла, покидая свои орбиты, может попасть в поле других атомов и, сталкиваясь с другими электронами, выбить их со своих орбит, что приведет к образованию новых порций свободных электронов.

В § 2 было указано, что электроны в атоме обладают не любыми, а только некоторыми, вполне определенными, значения-

ми энергии (энергетические уровни). У большинства металлов заполненная и свободная зоны перекрываются и между ними запретной зоны нет. Поэтому электроны металла легко переходят из заполненной зоны в свободную, что обусловливает высокую электропроводимость металлов. Если приложить к концам металлического проводника электродвижущую силу, то под действием электрического поля свободные электроны металла получат добавочную скорость, вызванную электрическим полем. С увеличением силы поля все бо́льшая и бо́льшая часть ранее хаотически двигавшихся электронов принимает участие в направленном движении. В проводнике возникает электрический ток. Электроны при своем движении сталкиваются с составными частями атомов и молекул металла и передают им часть своей кинетической энергии, увеличивая их тепловое движение. В результате этого температура проводника повышается. Как было указано выше, тепловые движения частиц металла затрудняют движение электронов. Следовательно, с увеличением температуры проводника электрическое сопротивление его увеличивается. Наличие примесей также приводит к увеличению сопротивления проводника. Можно предположить, что сопротивление чистых металлов при абсолютном нуле температуры (—273°) должно быть равно нулю. При этом наступает явление сверхпроводимости.

§ 30. Основные характеристики проводниковых материалов

Основными характеристиками проводниковых материалов являются:

1. Удельное электрическое сопротивление.
2. Температурный коэффициент сопротивления.
3. Теплопроводность.
4. Контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила.
5. Временное сопротивление разрыву и относительное удлинение при растяжении.

1. Удельное электрическое сопротивление ρ — величина, характеризующая способность материала оказывать сопротивление электрическому току. Удельное сопротивление выражается формулой:

$$\rho = \frac{rS}{l}.$$

Для длинных проводников (проводов, шнуров, жил кабелей, шин) длину проводника l обычно выражают в метрах, площадь поперечного сечения S — в $мм^2$, сопротивление проводника r — в $ом$, тогда размерность удельного сопротивления

$$[\rho] = \frac{ом \cdot мм^2}{м}$$

Данные удельных сопротивлений различных металлических проводников приведены на стр. 97.

2. Температурный коэффициент сопротивления α — величина, характеризующая изменение сопротивления проводника в зависимости от температуры.

Средняя величина температурного коэффициента сопротивления в интервале температур $t_2°—t_1°$ может быть найдена по формуле:

$$\alpha = \frac{r_2 - r_1}{r_1 (t_2° - t_1°)} \frac{1}{град}.$$

Данные температурных коэффициентов сопротивления различных проводниковых материалов приведены на стр. 95.

3. Теплопроводность λ — величина, характеризующая количество тепла, проходящее в единицу времени через слой вещества. Размерность теплопроводности $\lambda — \frac{ккал}{м \cdot час \cdot град}$. Теплопроводность имеет большое значение при тепловых расчетах машин, аппаратов, кабелей и других электротехнических устройств.

Значение теплопроводности λ для некоторых материалов

		$\frac{ккал}{м \cdot час \cdot град}$
Серебро	350—360	
Медь	340	
Алюминий	180—200	
Латунь	90—100	
Железо, сталь	40—50	
Бронза	30—40	
Бетон	0,7—1,2	
Кирпич	0,5—1,2	
Стекло	0,6—0,9	
Асбест	0,13—0,18	
Дерево	0,1—0,15	
Пробка	0,04—0,08	

Из приведенных данных видно, что наибольшей теплопроводностью обладают металлы. У неметаллических материалов теплопроводность значительно ниже. Она достигает особенно низких значений у пористых материалов, которые применяют специально для тепловой изоляции. Согласно электронной теории высокая теплопроводность металлов обусловливается теми же электронами проводимости, что и электропроводность.

4. Контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила.

Как было указано выше, положительные ионы металла расположены в узлах кристаллической решетки, образующей как бы ее каркас. Свободные электроны заполняют решетку наподобие газа, который называют иногда «электронным газом». Давление электронного газа в металле пропорционально абсо-

лютной температуре и числу свободных электронов в единице объема, которое зависит от свойств металла. При соприкосновении двух разнородных металлов в месте соприкосновения происходит выравнивание давления электронного газа. В результате диффузии электронов металл, у которого число электронов уменьшается, заряжается положительно, а металл, у которого число электронов увеличивается, заряжается отрицательно. В месте контакта возникает разность потенциалов. Эта разность пропорциональна разности температур металлов и зависит от их вида. В замкнутой цепи возникает термоэлектрический ток. Э. д. с., которая создает этот ток, называется термоэлектродвижущей силой (термо-э. д. с.).

Явление контактной разности потенциалов применяется в технике для измерения температуры при помощи термопар (см. § 56). При измерении малых токов и напряжений в цепи в местах соединения различных металлов может возникнуть большая разность потенциалов, которая будет искажать результаты измерений. В этом случае необходимо подобрать материалы так, чтобы точность измерения была высокой.

5. Временное сопротивление разрыву и относительное удлинение при растяжении.

При выборе проводов, помимо сечения, материала проводов, изоляции, необходимо учитывать их механическую прочность. Особенно это касается проводов воздушных линий электропередач. Провода испытывают растяжение. Под действием силы, приложенной к материалу, последний удлиняется. Если обозначить первоначальную длину l_1, а конечную длину l_2, то разность $l_2 - l_1 = \Delta l$ будет абсолютным удлинением.

Отношение $\frac{l_2 - l_1}{l_1} = \frac{\Delta l}{l_1} = \varepsilon$ называется относительным удлинением.

Сила, производящая разрыв материала, называется разрушающей нагрузкой, а отношение этой нагрузки к площади поперечного сечения материала в момент разрушения называется временным сопротивлением на разрыв и обозначается $\sigma_р \frac{кГ}{мм^2}$. Данные временных сопротивлений на разрыв для различных проводниковых материалов приведены на стр. 95.

§ 31. Проводниковые материалы

Современная электротехника пользуется твердыми, жидкими и при соответствующих условиях газообразными проводниками. Твердыми проводниками являются металлы. К жидким проводникам относятся электролиты и расплавленные металлы. Газы в качестве проводников используются в ионных приборах.

Металлические проводники можно разделить на две группы: материалы высокой проводимости и материалы высокого сопротивления. К первой группе материалов относятся химически чистые металлы — медь и алюминий, идущие на изготовление проводов, кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов. Хорошими проводниками являются некоторые сплавы — бронза и латунь, различные сплавы алюминия и сталь, нашедшие применение на практике вследствие их дешевизны по сравнению с чистыми металлами, а также благодаря высоким механическим свойствам.

Ко второй группе материалов относятся металлы и сплавы высокого сопротивления, применяемые в электронагревательных приборах, лампах накаливания, реостатах и т. п.

Наряду с металлами и их сплавами на практике в приборах освещения (прожекторы), коммутирования тока в электрических машинах (щетки), в электрометаллургии (электроды), в аппаратуре связи (микрофонные порошки) применяют различные изделия из угля.

§ 32. Материалы высокой проводимости

Медь является наиболее распространенным металлом в электротехнике. Преимуществами меди являются: малое удельное сопротивление ($\rho = 0{,}0172$—$0{,}0175$ *ом·мм²/м*); достаточно высокая механическая прочность (временное сопротивление разрыву 25—40 *кГ/мм²*); стойкость по отношению к коррозии; хорошая обрабатываемость; легкость пайки и сварки.

В тех областях электротехники, где нужна высокая механическая прочность, твердость и сопротивляемость истиранию, применяется твердая (твердотянутая) медь марки МТ. Такая медь идет на изготовление проводов воздушных линий электропередач, контактных проводов, шин распределительных устройств, пластин коллекторов электрических машин. Твердая медь, будучи нагрета до 400—700°, а затем охлаждена, становится мягкой. Мягкая медь марки ММ идет на изготовление проволоки круглого и прямоугольного сечения, жил кабелей, обмоточных проводов.

В электротехнике нашли себе применение сплавы на основе меди — бронза и латунь.

Бронза — сплав меди с оловом, кремнием, фосфором, бериллием, кадмием и другими элементами — имеет более высокую механическую прочность и твердость, чем медь (прочность на разрыв бронзовой проволоки 80—135 *кГ/мм²*). Бронза по сравнению с медью обладает меньшей электропроводимостью (10—95% по отношению к меди).

Латунь — сплав 50—70% меди и 30—50% цинка — применяется как конструктивный материал. Латунь хорошо обра-

батывается резанием, идет на изготовление деталей путем вытяжки и штамповки.

Алюминий занимает третье место по электропроводимости после серебра и меди ($\rho = 0{,}029$ *ом · мм²/м*).

Алюминий уступает меди и по механическим свойствам. Мягкий алюминий марки АМ имеет прочность на разрыв всего 8—9 *кГ/мм²*; твердый, неотожженный алюминий марки АТ имеет прочность на разрыв 18 *кГ/мм²*. Для увеличения механической прочности алюминия его сплавляют с кремнием, железом, магнием. Для проводов воздушных линий применяют один из таких сплавов — альдрей (0,3—0,5% магния, 0,4—0,7% кремния, 0,2—0,3% железа, остальное — алюминий). Прочность на разрыв альдрея 35 *кГ/мм²*. На линиях электропередач применяют также сталеалюминиевые провода, сердцевина которых свита из стальных проволок. Снаружи стальная жила обвита алюминиевой проволокой. В электротехнике алюминий идет на изготовление проводов, круглых и прямоугольных шин, алюминиевой фольги для конденсаторов и оболочек некоторых конструкций кабелей.

Сталь отличается большой механической прочностью. Используемая в качестве проводникового материала сталь содержит 0,10—0,15% углерода и имеет прочность на разрыв 70—75 *кГ/мм²*. Удельное сопротивление стали около 0,1 *ом · мм²/м*, т. е. сталь обладает электропроводимостью в 6—7 раз меньшей, чем медь. В отличие от меди и алюминия сталь является более дешевым и менее дефицитным материалом. Большой недостаток стали — малая стойкость ее по отношению к коррозии. Для предохранения стали от коррозии ее покрывают слоем более стойкого металла (например, цинка). Так как сталь относится к числу ферромагнитных материалов, то при протекании по стальному проводнику переменного тока сказывается явление поверхностного эффекта (см. § 87). Это выражается в том, что активное сопротивление проводника переменному току больше, чем постоянному току. Поэтому, исходя из условий допустимого нагрева проводов, переменный ток для проводов и шин следует применять меньший, чем постоянный ток. Кроме того, в стальном проводнике, включенном в цепь переменного тока, происходит потеря мощности на гистерезис (см. § 63).

Сталь используют в электротехнике для изготовления проводов, шин, сети заземления, рельсов для трамвая и электрифицированных железных дорог.

В целях экономии меди применяют биметаллические проводники. Внутренний слой биметаллического проводника образует сталь, поверх которой горячим или гальваническим способом нанесен слой меди. Оба металла образуют монолитный проводник. Медь составляет 50% веса проволоки. Прочность на разрыв биметаллического проводника 55—70 *кГ/мм²*.

§ 33. Различные металлы, применяемые в электротехнике

Свинец — мягкий, пластичный металл сероватого цвета. Прочность свинца на разрыв 1,6 *кГ/мм*^{2}. Свинец устойчив к действию воды, серной и соляной кислот. На воздухе свинец покрывается тонкой пленкой окиси, защищающей его от дальнейшего окисления. Уксусная и азотная кислоты, гниющие органические вещества, известь, свежезамешаиный бетои разрушающе действуют на свинец. Свинец применяют для защитных оболочек кабелей и проводов, а также изготовления пластии кислотных аккумуляторов. Свииец и его соединиения ядовиты.

Олово — серебристо-белый мягкий металл. Вода и воздух на олово ие действуют, разведеиные кислоты действуют на олово очень медленно. Олово применяют для лужеиия железа с целью предохранения его от ржавлеиия (белая жесть). Тонко раскатанные листы олова (станиоль) используют для изготовления конденсаторов. Олово входит в состав бронз, баббитов и сплавов для пайки.

Вольфрам — серебристо-белый твердый металл, получаемый путем сложной химической обработки обогащенных руд (вольфрамита). В результате обработки получается порошок чистого вольфрама. Из порошка путем давления (до 2000 *ат*) прессуют кубики, которые затем нагревают до 700°. При этом зерна порошка вольфрама спекаются и получается плотиый металл. Из вольфрама вытягивают проволоку, прокатывают листы. Вольфрам является наиболее тугоплавким из всех металлов. Температура его плавления 3370±50°. Металлический вольфрам широко применяется в электровакуумной технике для изготовления нитей ламп накаливания, электронных ламп, антикатодов рентгеновских трубок и т. п.

Ртуть — серебристо-белый металл, находящийся при обычиой температуре в жидком виде. Ртуть применяется при изготовлении ртутных выпрямителей, ртутных ламп, ртутных контактов. Ртуть и особенно пары ее — ядовиты.

В табл. 7 помещены основные характеристики металлов и сплавов, применяемых в электротехнике.

§ 34. Электротехиический уголь

Электротехнический уголь получают из сажи, каменного угля, кокса, естественного графита. Сырьевые материалы, служащне для изготовления электроугольных изделий, измельчаются, сортируются, смешиваются со связующими веществами (каменноугольная смола или жидкое стекло). Приготовленная масса протягивается через мундштук (при изготовлении стержиевых электродов) или прессуется в пресс-формах (при изготовлении угольных изделий сложной формы). Затем

Таблица 7

Основные характеристики металлов и сплавов

Наименование металла	Плотность в $г/см^3$	Температура плавления в град.	Предел прочности на разрыв в $кГ/мм^2$	Удельное электрическое сопротивление в $ом \cdot мм^2/м$	Температурный коэффициент сопротивления, $1/°C$	Область применения
Алюминий	2,69—2,7	657—660	8—25	0,026—0,028	0,00403—0,00429	Провода, кабели, шины, фольга
Альдрей	2,7	1100	30—38	0,029—0,032	0,0036—0,0038	Провода высоковольтных линий
Бронза	8,3 —8,9	885—1050	31—135	0,02—0,05	0,004	Контакты, пружины, контактные провода
Вольфрам	19,3—20,0	3370±50	100—300	0,053—0,055	0,004—0,005	Нити ламп накаливания, электроды, ламп, контакты
Золото	19,3	1063	—	0,022—0,023	0,0036	Контакты в сплавах с серебром
Латунь	8,4—8,7	900—960	30—70	0,031—0,079	0,002	Контакты, зажимы
Медь	8,7—8,9	1083	27—44,9	0,0175—0,0182	0,004	Провода, кабели, шины
Молибден	10,2	2570—2630	80—250	0,048—0,054	0,0047—0,005	Электровакуумная техника (аноды, крючки и сетки электроламп)
Никель	8,8—8,9	1452	40—70	0,07—0,079	0,006	Катоды электронных ламп, аноды сетки
Олово	7,3	232	2—5	0,11—0,12	0,0043—0,0044	Припой для лужения и пайки, фольга
Платина	21,4	1773	15—35	0,09—0,1	0,0025—0,0039	Термопары, нагревательные спирали печей, контакты электроприборов
Ртуть	13,54—13,55	—38,9	—	0,958	0,009	Электроды в терморегуляторах, ртутных выпрямителях
Сталь	7,8	1400—1530	70—75	0,103—0,137	0,0057—0,006	Провода, кабели, шины, рельсы
Серебро	10,5	960,5	15—30	0,016—0,0162	0,0034—0,0036	Контакты электроприборов и аппаратов
Свинец	11,34	327,4	0,95—2,0	0,217—0,222	0,0038—0,004	Защитные оболочки кабелей, вставки предохранителей, пластины аккумуляторов
Цинк	7,1	419,4—430	14—29	0,05—0,06	0,0039—0,0041	Антикоррозийные покрытия, контакты
Чугун	7,2—7,6	1200	12—32	0,5—1,4	0,0009—0,001	Сопротивления реостатов

Примечание. Бо́льшие значения плотности, предела прочности и удельного электрического сопротивления относятся к твердотянутым металлам; меньшие значения этих характеристик относятся к отожженным металлам.

угольные заготовки подвергают обжигу при температуре 800—3000°. Щетки электрических машин служат для создания скользящего контакта между неподвижными и подвижными частями машин.

Щетки имеют контактную поверхность (поверхность, прилегающую к коллектору) размером от 4×4 *мм* до 35×35 *мм*. Высота щеток — от 12 до 70 *мм*. Промышленность выпускает несколько разновидностей щеток: угольнографитные (Т и УГ), графитные (Г), электрографитные (ЭГ), медиографитные (М и МГ), бронзографитные (БГ).

§ 35. Сплавы высокого сопротивления

Сплавы высокого сопротивления делятся на три группы:

1. Сплавы для магазинов сопротивлений, различных эталонов, добавочных сопротивлений, шунтов.
2. Сплавы для сопротивлений и реостатов.
3. Сплавы для электронагревательных приборов и печей.

К сплавам первой группы предъявляют следующие требования: высокое удельное сопротивление, близкий к нулю температурный коэффициент сопротивления, малая термоэлектродвижущая сила в сочетании с другими металлами (особенно с медью), постоянство сопротивления во времени, высокая стойкость против коррозии. К сплавам этой группы относятся сплавы на основе меди — манганин и константан.

Манганин — сплав коричнево-красноватого цвета, состоящий из 86% меди, 12% марганца и 2% никеля. Манганин имеет удельное сопротивление 0,42—0,43 $ом \cdot мм^2/м$, плотность 8,4 $кг/дм^3$, прочность на разрыв 40—55 $кГ/мм^2$, очень малые температурный коэффициент сопротивления и термо-э. д. с., допустимую рабочую температуру не выше 60°. Манганин является лучшим материалом для изготовления магазинов сопротивлений, образцовых сопротивлений и шунтов.

Константан — сплав 60% меди и 40% никеля. Константан имеет удельное сопротивление 0,5 $ом \cdot мм^2/м$, плотность 8,9 $кг/дм^3$, прочность на разрыв 40—50 $кГ/мм^2$.

Константан применяется для изготовления реостатов и электронагревательных сопротивлений, если их рабочая температура не превышает 400—450°.

Константан в сочетании с медью имеет высокую термо-э. д. с. и поэтому не может быть применен для изготовления эталонных сопротивлений к точным приборам, так как эта дополнительная э. д. с. будет искажать показания приборов. Это свойство константана используется при изготовлении термопар для измерения температур порядка нескольких сотен градусов.

Сплавы для сопротивлений и реостатов должны быть дешевыми, иметь большое удельное сопротивление и малый темпе-

ратурный коэффициент сопротивления. Для этих целей применяют сплавы на медной основе, например константан, никелин и др.

Для удешевления материала никель в реостатных сплавах заменен цинком и железом. Сплавы, применяемые для электронагревательных приборов и печей, должны хорошо обрабатываться, быть механически прочными, дешевыми, иметь высокое удельное сопротивление и длительное время работать при высокой температуре без окисления.

При нагреве металла на его поверхности образуется оксидная пленка, которая должна предотвратить дальнейшее разрушение металла. Металлы — медь, железо и кобальт — имеют пористую оксидную пленку, поэтому при нагревании они быстро разрушаются. Такие металлы, как никель, хром и алюминий, покрываются при нагреве плотной оксидной пленкой, поэтому жароупорные сплавы делают на основе этих металлов.

Нихром — сплав никеля и хрома. К нихромам относится также ферронихром, который, кроме никеля и хрома, содержит железо (58—62% никеля, 15—17% хрома, остальное — железо). Плотность нихрома 8,4 *кг/дм*^{3}, прочность на разрыв 70 *кГ/мм*^{2}, удельное сопротивление около 1,0 *ом · мм*^{2}*/м*. Нихром выпускается в виде проволоки и ленты, которые идут на изготовление спиралей электронагревательных приборов и печей, имеющих рабочую температуру до 1000°.

Фехраль — сплав 12—15% хрома, 3—5% алюминия, остальное — железо. Фехраль имеет плотность 7,5 *кг/дм*^{3}, прочность на разрыв 70 *кГ/мм*^{2} и удельное сопротивление около 1,2 *ом · мм*^{2}*/м*. Рабочая температура фехраля около 800°.

Хромаль — сплав 28—30% алюминия, остальное — железо. Прочность хромаля на разрыв 80 *кГ/мм*^{2}, удельное сопротивление 1,3—1,4 *ом · мм*^{2}*/м*, допустимая рабочая температура 1250°.

Характеристики сплавов высокого сопротивления приведены в табл. 8.

§ 36. Полупроводники

Свое название полупроводники получили оттого, что они занимают промежуточное место между проводниками (металлы, электролиты, уголь), обладающими большой электропроводимостью, и изоляторами (фарфор, слюда, резина и др.), которые почти не проводят электрического тока.

Если сравнить удельное объемное сопротивление в *ом · см* для различных веществ, то окажется, что проводники имеют: $\rho_U = 10^{-6}—10^{-3}$ *ом · см*; полупроводники $\rho_U = 10^{-3}—10^{8}$ *ом · см*: диэлектрики $\rho_U = 10^{8}—10^{20}$ *ом · см*. К полупроводникам относятся: окислы металлов — оксиды (Al_2O_3, Cu_2O, ZnO, TiO_2, VO_2, WO_2,

Наименование материала (сплава)	Плотность в $г/см^3$	Температура плавления в °С	Предел прочности на разрыв в $кГ/мм^2$	Удельное электрическое сопротивление в $ом \cdot мм^2/м$
Константан	8,7—8,9	1200—1275	40—55 65—70	0,45—0,48 0,46—0,52
Манганин	8,14—8,4	920—960	45—55 60—70	0,42—0,48 0,43—0,5
Нейзильбер	8,3—8,5	1050	35—40 45—53 55—60	0,30—0,35 0,40—0,45
Нихром (Х15Н60) — сплав 15% хрома и 60% никеля	8,2—8,25	1380—1390	55—65	1,02—1,18
Нихром (Х20Н80) — сплав 20% хрома и 80% никеля	8,4	1400	60—70	1,02—1,27
Фехраль (Х13Ю4)	7,2—7,4	1450—1480	58—65	1,1—1,25
Нихром (Х20Н80Т)	8,0	1510—1520	65—70	1,02—1,17
Нихром (Х20Н80Т3)	8,0	1520—1530	65—75	1,18—1,36

Примечание. Меньшие значения предела прочности и удельного элек
ленты); бо́льшие значения этих характеристик относятся к твердым сортам

Таблица 8

вов высокого сопротивления

Температурный коэффициент сопротивления, 1/°С	Термо-э. д. с. сплава в паре с медью в *мкв*/°С	Наибольшая рабочая температура в °С	Область применения
$5 \cdot 10^{-5}$	39—42	450—500	Реостаты и сопротивления приборов низкого класса точности. Нагревательные элементы с температурой 400—450°. Термоэлектроды в сочетании с медью и железом
$(3—6) \cdot 10^{-5}$	0,9—1,0	250—300	Эталонные сопротивления, магазины сопротивлений, шунты и сопротивления приборов высокого класса точности
$(28—30) \cdot 10^{-5}$	14—16	200—250	Реостаты
$0{,}17 \cdot 10^{-3}$	—	1000	Лабораторные и промышленные печи с рабочей температурой до 900°
$0{,}15 \cdot 10^{-3}$	—	1050	Лабораторные и промышленные печи с рабочей температурой до 1000°
$0{,}05 \cdot 10^{-3}$	—	850	Бытовые электронагревательные приборы и промышленные печи с рабочей температурой до 650°.
$0{,}14 \cdot 10^{-3}$	—	1200	Промышленные печи с рабочей температурой до 1150°
$0{,}08 \cdot 10^{-3}$	—	1200	То же

трического сопротивления относятся к мягким сортам сплавов (проволока сплавов.

MoO_3); сернистые соединения — сульфиды (Cu_2S, Ag_2S, ZnS, CdS, HgS); соединения с селеном — селениды; соединения с теллуром — теллуриды; некоторые сплавы ($MgSb_2$, ZnSb, Mg_2Sn, CdSb, AlSb, InSb, ClSb); химические элементы — германий, кремний, теллур, селен, бор, углерод, сера, фосфор, мышьяк, а также большое число сложных соединений (гален, карборунд и др.).

Полное и широкое исследование свойств полупроводников выполнено советским ученым А. Ф. Иоффе и его сотрудниками.

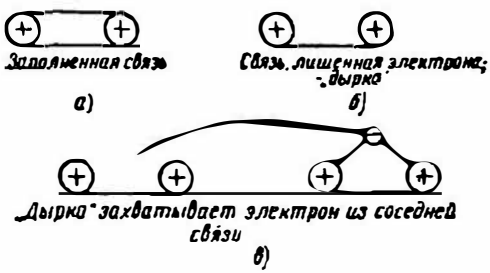
Электрические свойства полупроводников резко отличаются от свойств проводников и изоляторов. Электропроводимость полупроводников в сильной степени зависит от температуры, освещенности, наличия и интенсивности электрического поля, количества примесей. При обычной температуре в полупроводниках есть некоторое количество свободных электронов, образовавшихся вследствие разрыва электронных связей. У полупроводников различают два вида проводимости: электронную и дырочную. Электронная проводимость осуществляется свободными электронами, а дырочная — передвижением связей, лишенных электронов.

Рассмотрим следующий опыт. Возьмем металлический проводник и будем нагревать один его конец, тогда нагретый конец проводника получит положительный заряд, а холодный конец — отрицательный заряд. Это объясняется перемещением электронов от горячего конца к холодному, в результате чего на горячем конце проводника получается недостаток электронов (положительный заряд), а на холодном конце избыток электронов (отрицательный заряд). Кратковременное протекание тока по проводнику было вызвано перемещением электронов с одного края проводника на другой. Таким образом, здесь речь идет о проводнике с электронной проводимостью. Однако существуют вещества, которые при подобном опыте ведут себя иначе: нагретый край такого вещества получает отрицательный заряд, а холодный край — положительный заряд. Это возможно, если предположить, что перенос тока осуществляется положительными зарядами.

Познакомимся с другим видом проводимости у полупроводников — дырочной проводимостью. В чистых полупроводниках все электроны, слабо связанные с ядрами, участвуют в электронных связях. На фиг 47, *а* условно показана заполненная связь между двумя атомами вещества. «Дыркой» называется элемент кристаллической решетки вещества, потерявший электрон, что соответствует появлению положительного заряда (фиг. 47, *б*).

Освободившаяся связь может вновь оказаться заполненной, если «дырка» захватит электрон из соседней связи (фиг. 47, *в*). Это вызовет переход «дырки» на новое место. В веществе полупроводника, находящегося в нормальных условиях, направление вылета электронов и место образования «дырки» носят

хаотический характер. Если к чистому полупроводнику приложить постоянное напряжение, то электроны и «дырки» будут перемещаться (первые против направления сил поля, вторые в противоположном направлении). Если число образующихся «дырок» будет равно числу освободившихся электронов, то, как это бывает у чистых полупроводников, проводимость полупроводников невелика (собственная проводимость). Наличие даже небольшого количества посторонних примесей может изменить

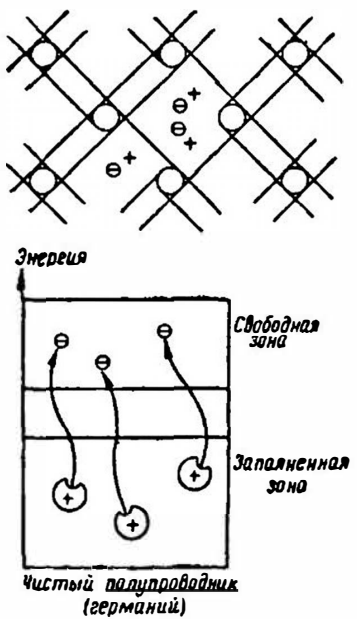


Фиг. 47. Связь между атомами вещества

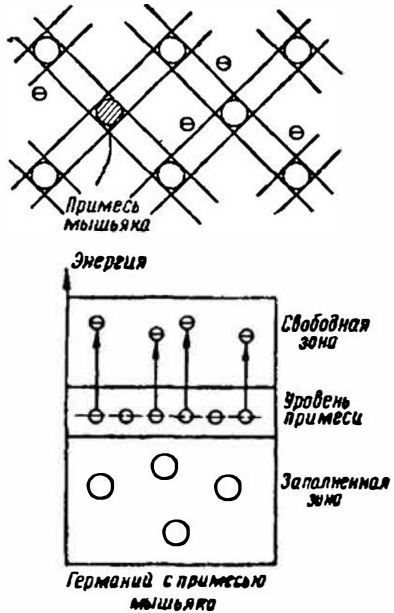
механизм электропроводимости: сделать его электронным или дырочным. Рассмотрим конкретный пример. В качестве полупроводника возьмем германий (Ge). В кристалле германия каждый атом связан с четырьмя другими атомами. При увеличении температуры или в результате облучения парные связи кристалла германия могут быть нарушены. При этом образуется равное количество свободных электронов и «дырок» (фиг. 48).

Добавим к германию в качестве примеси мышьяк. Такая примесь обладает большим числом слабосвязаиных электронов. Атомы примеси имеют свой энергетический уровень, располагающийся между энергетическими уровиями свободиой и заполненной зон, ближе к последней (фиг. 49). Подобные примеси отдают свои электроны в свободную зону и называются донорными примесями. В полупроводнике окажется наличие свободных электронов, в то время как все связи будут заполнены. Полупроводник будет обладать электронной проводимостью в свободной зоне.

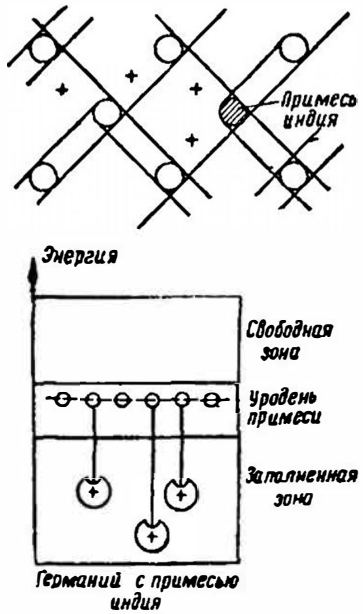
Если теперь в качестве примеси к германию добавить не мышьяк, а индий, то произойдет следующее. Такая примесь обладает малым числом слабо связанных электронов, а энергетический уровень примеси располагается между энергетическими уровнями свободной и заполненной зон, ближе к свободной зоне (фиг. 50). Примеси этого рода принимают в свою зону электроны из соседней заполненной зоны и называются акцепторными примесями. В полупроводнике окажутся незаполненные связи — «дырки» при отсутствии свободных электро-



Фиг. 48. Собственная проводимость полупроводника



Фиг. 49. Электронная проводимость полупроводника



Фиг. 50. Дырочная проводимость полупроводника

нов. Полупроводник будет обладать дырочной проводимостью в заполненной зоне.

Теперь станет понятным опыт нагрева полупроводника, когда нагретый конец получал отрицательный заряд, а холодный конец — положительный заряд. Под действием тепла на горячем конце начнут разрушаться связи, возникнут «дырки» и свободные электроны. Если полупроводник содержит примеси, которые будут связывать свободные электроны, образуя при этом отрицательные ионы примеси, то «дырки» начнут переходить к холодному концу, заряжая его положительно, а нагретый конец полупроводника зарядится отрицательно.

Заканчивая рассмотрение полупроводников, делаем следующий вывод.

Добавлением к полупроводнику примесей можно придать ему преобладающую электронную или дырочную проводимость.

Полупроводники с электронной проводимостью называют полупроводниками *n*-типа (негативные), а с дырочной проводимостью — *p*-типа (позитивные).

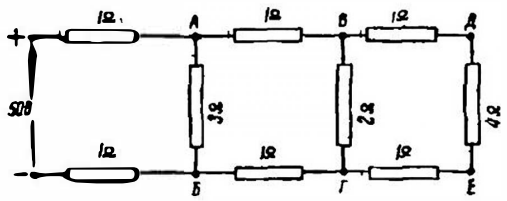
Задачи для самостоятельного решения

1. Определить сопротивление 100 *м* железной проволоки диаметром 1 *мм*.
2. Каково сопротивление алюминиевого провода сечением 2,5 *мм*² и длиной 300 *м*?
3. Необходимо изготовить реостат на 20 *ом* из никелиновой проволоки. Определить сечение проволоки, если длина ее равна 5 *м*.
4. Сопротивление спирали электрической плитки равно 24 *ом*. Какова должна быть длина нихромовой проволоки для этой спирали, если сечение проволоки 0,5 *мм*²?
5. 200 *м* проволоки сечением 4 *мм*² имеют сопротивление 6,5 *ом*. Определить материал проводника.
6. Длина проводника 25 *см*. Материал проводника — вольфрам. Определить сечение проводника, если сопротивление проводника 0,05 *ом*.
7. Вычислить сопротивление телеграфной проволоки диаметром 4 *мм*, длиной 150 *км*, если материалом проволоки является железо.
8. Проводимость нихромовой проволоки длиной 80 *м* равна $0{,}025\frac{1}{ом}$ Определить сечение проволоки.
9. Определить температуру обмотки электрической машины, выполненной из медной проволоки, если до включения машины ее сопротивление при 15° было 70 *ом* и во время работы увеличилось до 85,05 *ом*.
10. По нихромовой спирали электрической плитки проходит ток в 5 *а*. Сечение проволоки 0,6 *мм*². Определить длину проволоки, если плитка включена в сеть напряжением 120 *в*.
11. Имеется катушка медной проволоки сечением 0,5 *мм*². Длина проволоки 200 *м*. Какое напряжение может создать в этой катушке ток в 4 *а*?
12. Для устойчивого горения дугового фонаря необходимо иметь 60 *в* и 10 *а*. Для питания фонаря установлен генератор с напряжением 120 *в*. Определить величину добавочного сопротивления к дуговому фонарю, если сопротивление соединительных проводов 0,2 *ом*.
13. Вольтметр рассчитан на 20 *в*. По обмотке его протекает ток 0,05 *а*. Чтобы вольтметр включить в сеть на 100 *в*, пришлось поставить добавочное сопротивление. Определить его величину.
14. При напряжении 60 *в* в цепи проходит ток 2,5 *а*. Какое дополнительное сопротивление необходимо включить, чтобы в цепи проходил ток в 2 *а*?

15. Источник э. д. с. дает напряжение 50 *в*. В цепь включено сопротивление в 0,3 *ом*. Каждый из подводящих проводов имеет сопротивление по 1 *ом*. Параллельно первому (к концам его) включено второе сопротивление 2 *ом* через соединительные провода по 1 *ом*. Параллельно второму (к концам его) включено третье сопротивление 4 *ом* через соединительные провода также по 1 *ом* (фиг. 51). Определить показания вольтметров, включенных на зажимы каждого сопротивления (в точках *А—Б*, *В—Г* и *Д—Е*).

16. Электрическая цепь состоит из проводов сопротивлением 0,4 *ом*, электрической лампы сопротивлением 150 *ом* и реостата на 120 *ом*. Каково сопротивление всей цепи, если провода, лампа и реостат включены последовательно?

17. Четыре проводника с сопротивлением 3, 4, 6 и 2 *ом* включены между собой параллельно. Определить общее сопротивление проводников.



Фиг. 51. К задаче 15

18. Определить сопротивление медного провода длиной 800 *м*, состоящего из семи проволочек диаметром по 1,7 *мм*.

19. Железная проволока длиной 20 *м*, сечением 1,5 *мм*^{2}, алюминиевая проволока длиной 50 *м*, сечением 2 *мм*^{2}, нихромовая проволока длиной 10 *м*, сечением 0,5 *мм*^{2} включены последовательно в сеть. Определить общее сопротивление всех проволок.

20. Первая ветвь параллельного соединения состоит из сопротивления 18 *ом*. Вторая ветвь состоит из трех последовательно включенных сопротивлений по 12 *ом*. Определить общее сопротивление разветвления.

21. Восемь проводников сопротивлением по 10 *ом* соединены в четыре одинаковые параллельные группы. Определить общее сопротивление цепи.

22. Проводник сопротивлением 7 *ом* включен последовательно с разветвлением, состоящим из четырех проводников в 2, 4, 6 и 8 *ом*. Определить общее сопротивление цепи.

23. Разветвление из трех параллельно включенных сопротивлений в 3, 8 и 6 *ом* включено последовательно с другим разветвлением, состоящим из четырех сопротивлений в 2, 7, 6 и 3 *ом*. Определить общее сопротивление цепи.

24. Три проводника соединены между собой параллельно. Сопротивление первого проводника 3 *ом*, второго 4 *ом*, третьего 6 *ом*. Ток, протекающий по первому проводнику, равен 2 *а*. Определить общий ток.

25. Напряжение сети 12 *в*. Общий ток, потребляемый четырьмя параллельно включенными одинаковыми лампами, равен 8 *а*. Определить сопротивление каждой лампы.

26. Группа из трех параллельно соединенных проводников в 2, 9 и 6 *ом* соединена последовательно с другой группой из четырех параллельно соединенных проводников в 2, 4, 6 и 3 *ом*. Напряжение сети равно 30 *в*. Определить ток в каждом проводнике.

27. Напряжение генератора 110 *в*. В сеть включены параллельно сорок ламп по 200 *ом* каждая. Определить э. д. с. машины, если внутреннее сопротивление ее 0,2 *ом*.

28. Имеется разветвление, состоящее из четырех параллельно включенных сопротивлений в 6, 4, 3 и 8 *ом*. Ток, притекающий к точке разветвления, 20 *а*. Определить ток, протекающий по каждой ветви.

29. Электродвигатель на 120 *в*, потребляющий ток в 25 *а*, установлен на расстоянии 200 *м* от источника электрической энергии. Определить сечение медных проводов, идущих к двигателю, если напряжение источника энергии 125 *в*.

30. Длина линии электропередачи 300 *м*. Линия выполнена медным про-

водом сечением 150 *мм*². Завод потребляет ток 200 *а*. Какое напряжение получит завод, если напряжение на выводах электростанции 240 *в*?

31. Сколько электрической энергии расходует электрическая печь в течение 30 мин., если она потребляет ток 10 *а* при напряжении 120 *в*?

32. На цоколе лампы накаливания написано: 200 w, 220 v. Определить сопротивление нити накаливания.

33. Мощность электрического двигателя 3 *квт*. Каков ток в обмотке этого двигателя, если напряжение сети равно 120 *в*?

34. Электродвигатель, подключенный к сети 220 *в*, потребляет ток в 8 *а*. Какую работу совершает ток в течение 2 час. 30 мин. и какова мощность двигателя?

35. В квартире имеется шесть ламп. Две из них мощностью по 40 *вт* горят в сутки по 5 час., две мощностью по 60 *вт* горят по 6 час. и две по 15 *вт* горят по 4 часа. Сколько нужно заплатить за горение всех ламп в течение месяца (30 дней) при тарифе 4 коп. за 1 *квт* · *ч*?

36. Электрический двигатель мощностью 5 *квт*, напряжением 110 *в* установлен на пилораме. Энергию двигателю дает генератор, расположенный на расстоянии 150 *м* от двигателя. Напряжение генератора поддерживается равным 120 *в*.

Определить: а) сечение медных проводов, идущих от генератора к двигателю, б) мощность генератора, в) потерю мощности в проводах.

37. На электростанции установлен генератор на 240 *в*. Энергия подается потребителю на расстояние 200 *м*. Потребитель забирает из сети ток 60 *а*. Потеря мощности в проводах равна 10% от передаваемой мощности. Определить сечение медных проводов линии.

38. К генератору, дающему для гальваностегии ток 900 *а*, напряжением 6 *в*, установлен бензиновый двигатель. Определить мощность этого двигателя в лошадиных силах, если к. п. д. передачи 95%.

39. Генератор дает напряжение 115 *в* и обладает мощностью в 10 *квт*. Энергия передается по алюминиевым проводам сечением 95 *мм*² на расстояние 250 *м*. Определить мощность, получаемую потребителем.

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим сопротивлением?
2. От чего зависит электрическое сопротивление?
3. В каких единицах измеряется электрическое сопротивление?
4. Что называется удельным сопротивлением?
5. Как определить сопротивление проводника, если известны его длина, материал и сечение?
6. Что называется электрической проводимостью?
7. Как читается закон Ома для участка и какова его формула?
8. Как подсчитать падение напряжения в проводах, если известны сопротивление проводов и ток нагрузки?
9. Как читается закон Ома для всей цепи и какова его формула?
10. Что называется коротким замыканием, каковы его последствия и как его предотвратить?
11. Как осуществляется последовательное соединение проводников?
12. Как осуществляется параллельное соединение проводников?
13. Как формулируется первый закон Кирхгофа?
14. Как осуществляется смешанное соединение проводников?
15. Как формулируется второй закон Кирхгофа?
16. По каким действиям можно судить о работе электрического тока?
17. В каких единицах измеряется работа электрического тока?
18. Что называется электрической мощностью, чем она измеряется и в каких единицах?
19. Как определить мощность, не имея ваттметра?

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ХИМИЧЕСКИЕ ДЕЙСТВИЯ ТОКА И ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ Э. Д. С.

§ 37. Электролиз

Как было указано выше, к числу проводников электрического тока наряду с металлами, их сплавами и углем относятся также растворы кислот, щелочей и солей. При прохождении тока через металлический проводник в последнем не происходит изменения вещества. Электрический ток в таких проводниках вызывается движением свободных электронов вдоль проводника.

Ток, проходя по жидким проводникам, разлагает их на составные части. Поэтому жидкие проводники называются проводниками второго рода или электролитами в отличие от металлических проводников, которые называются проводниками первого рода. Разложение электролитов под действием электрического тока называется э л е к т р о л и з о м.

Электролиз производят в гальванических ваннах. Гальваническая ванна представляет собой сосуд, куда налита жидкость — электролит, подвергающаяся разложению током.

В сосуд с электролитом опускают две пластины (например, угольные), которые будут являться электродами. Присоединим отрицательный полюс источника постоянного тока к одному электроду (катоду), а положительный полюс — к другому электроду (аноду) и замкнем цепь. Явленне электролиза будет сопровождаться выделением вещества на электродах. Как показывают опыты, при электролизе водород и металлы всегда выделяются на катоде. Отсюда следует, что прохождение тока по жидким проводникам связано с движением атомов вещества.

Что же представляет собою ток в электролитах?

Согласно современной теорни нейтральная молекула вещества, попадая в растворитель, распадается (диссоциируется) на части — ноны, несущие на себе равные и противоположные электрические заряды. Это объясняется тем, что сила взаимодействия между зарядами, помещенными в среду с электрической проницаемостью ε, уменьшается в ε раз (см. формулу Кулона). Поэтому снлы, связывающне молекулу вещества, на-

ходящуюся в растворителе с большой электрической проницаемостью (например воды с $\varepsilon=81$), ослабевают, и достаточно тепловых соударов молекул, чтобы они начали делиться на ионы, т. е. диссоциировать.

Наряду с диссоциацией молекул в растворе происходит обратный процесс — воссоединение ионов в нейтральные молекулы (молизация).

Кислоты диссоциируют на положительно заряженные ионы водорода и отрицательно заряженные ионы кислотного остатка:

$$HCl \rightleftarrows H^+ + Cl^-$$

$$HNO_3 \rightleftarrows H^+ + NO_3^-$$

$$H_2SO_4 \rightleftarrows H^{++} + SO_4^{--}$$

Щелочи диссоциируют на ионы металла и ионы водного остатка:

$$NaOH \rightleftarrows Na^+ + OH^-$$

$$KOH \rightleftarrows K^+ + OH^-$$

$$Ba(OH)_2 \rightleftarrows Ba^{++} + 2OH^{--}$$

Соли диссоциируют на ионы металла и ионы кислотного остатка:

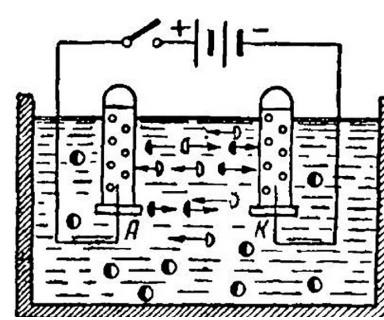
$$NaCl \rightleftarrows Na^+ + Cl^-$$

$$KNO_3 \rightleftarrows K^+ + NO_3^-$$

$$CuSO_4 \rightleftarrows Cu^{++} + SO_4^{--}$$

Если приложить к электродам постоянное напряжение, то между электродами образуется электрическое поле. Положительно заряженные ионы будут двигаться по направлению к катоду, отрицательно заряженные ионы — к аноду. Достигая электродов, ионы нейтрализуются. Рассмотрим электролиз воды (фиг. 52).

Электролиз воды. В качестве электролита берется вода. Для лучшей проводимости в воду добавляют немного кислоты, щелочи или соли. При пропускании тока через ванну на обоих электродах *А* и *К* будет видно выделение газовых пузырьков. Если поместить над электродами опрокинутые пробирки с водой, то пузырьки газов будут подниматься вверх, вытесняя воду. Пробирка, по-



● *ионы водорода* $H_2^{+\ +}$

● *ионы кислорода* $O^{-\ -}$

○ *молекула воды*

Фиг. 52. Электролиз воды

крывающая катод K, наполняется газом вдвое быстрее, чем другая пробирка. Если первую пробирку приподнять (не перевертывая ее) и поднести к ней зажженную спичку, то находящийся там газ сгорает голубоватым пламенем и слышится звук наподобие щелчка. Этот газ — водород.

Если поднести тлеющую лучинку к вынутой пробирке, покрывающей анод, то лучинка вспыхнет ярким пламенем. Это показывает, что в пробирке собран кислород.

При помощи описанного опыта было доказано, что вода состоит из химического соединения двух газов — кислорода и водорода.

Электролиз медного купороса. Нальем в сосуд раствор медного купороса и в качестве электродов опустим две угольные пластины. Молекулы медного купороса распадаются на ионы Cu^{++} и SO_4^{--}. Подключим источник постоянного напряжения. Ионы начнут переходить к соответствующим электродам. Ион Cu^{++}, достигая катода, получает от него электроны и в виде нейтральной молекулы меди оседает на угольной пластине. Ион SO_4^{--}, подходя к аноду, отдает ему избыток электронов и превращается в нейтральный неустойчивый SO_4, который распадается на SO_3 и О. Кислород будет выделяться на аноде, а SO_3, вступая в соединение с водой, образует молекулу серной кислоты:

$$SO_3 + H_2O = H_2SO_4.$$

Количество меди, отлагаемой на катоде, с течением времени будет увеличиваться, а количество меди в растворе будет становиться меньше. Если же угольный анод заменить медной пластиной, то выделяющийся на аноде SO_4, вступая в химическое соединение с веществами пластины, дает вторичную реакцию:

$$SO_4 + Cu = CuSO_4.$$

В этом случае концентрация раствора не изменяется, но отложение меди на катоде сопровождается растворением медной анодной пластины.

Из предыдущего видно, что электрический ток в электролитах представляет собою движение заряженных частиц вещества — ионов. Таким образом, если металлические проводники обладают электронной проводимостью, то электролиты имеют ионную проводимость.

В проводниках второго рода, так же как и в проводниках первого рода, существует зависимость между напряжением (разностью потенциалов) и током, выраженная законом Ома.

§ 38. Первый закон Фарадея

Явление электролиза с количественной и качественной стороны исследовано Фарадеем.

Фарадеем установлено, что количество вещества, выделяющегося при электролизе на электродах, пропорционально току и времени его прохождения или иначе — количеству электричества, протекшего через электролит.

Это — первый закон Фарадея.

Один и тот же ток, проходя одинаковое время через различные электролиты, выделяет на электродах различное количество вещества. Количество вещества в миллиграммах, выделяемое на электроде током в 1 *а* в течение 1 *сек.*, называется электрохимическим эквивалентом и обозначается буквой α.

Электрохимический эквивалент можно определить опытным путем.

Пусть имеется гальваническая ванна с раствором медного купороса. Точное взвешивание катодной пластины до опыта показало, что вес ее, предположим, 50 *г*. Присоединяем источник тока и устанавливаем в цепи ток $I=3$ *а*. По истечении 30 мин. выключаем ток и вторично взвешиваем катодную пластину. За счет отлагаемой меди вес ее увеличился до 51,7766 *г*.

Следовательно, при токе 3 *а* за время 30 мин. (1800 сек.) выделилось меди 51,7766—50=1,7766 *г* или 1776,6 *мг*. Ток в 1 *а* в течение 1 сек. выделил бы:

$$\frac{1776,6}{1800\cdot 3}=0,329 \text{ } мг \text{ меди.}$$

Так, опытным путем мы нашли электрохимический эквивалент меди.

Производя подобные опыты с разнообразными электролитами, мы можем найти электрохимические эквиваленты для других веществ.

Ниже приведены электрохимические эквиваленты ряда веществ:

Алюминий	0,0936	Серебро	1,118
Железо	0,289	Ртуть	2,072
Золото	0,681	Никель	0,304
Медь	0,329	Водород	0,0104
Свинец	1,072	SO_4	0,4975
Цинк	0,3387		

Первый закон Фарадея выражается формулой:

$$M=\alpha It \text{ или } M=\alpha Q,$$

где M — количество вещества в миллиграммах;

α — электрохимический эквивалент;

I — ток в амперах;

t — время в секундах;
Q — количество электричества в кулонах.

Пример 1. Определить, какое количество металлического никеля выделит на катоде из раствора сернокислого никеля ток 5 *а* в течение 20 мин.

$I = 5$ *а*;
$t = 20$ мин. $= 1200$ сек.;
$\alpha = 0{,}304$;
$M = ?$
$M = \alpha It = 0{,}304 \cdot 5 \cdot 1200 = 1824$ *мг*.

Необходимо заметить, что количество вещества, выделяющегося при электролизе, не зависит от формы гальванической ванны, концентрации раствора, температуры и т. п.

§ 39. Второй закон Фарадея

Из химии известно, что химическим эквивалентом (m) вещества называется отношение атомного веса (A) к валентности (n):

$$m = \frac{A}{n}.$$

Если подсчитать отношение электрохимического эквивалента вещества к его химическому эквиваленту, то для всех веществ мы получим одно и то же число — 0,01036 (табл. 9).

Таблица 9

Зависимость между электрохимическим и химическим эквивалентами вещества

Вещество	Электрохимический эквивалент α	Атомный вес A	Валентность n	Химический эквивалент m	Отношение $\frac{\alpha}{m}$
Водород	0,0104	1,008	1	1,008	0,01036
Серебро	1,118	107,88	1	107,88	0,01036
Никель	0,304	58,68	2	29,34	0,01036
Алюминий	0,0936	27,1	3	9,03	0,01036
SO_4	0,4975	96,07	2	48,03	0,01036

Второй закон Фарадея устанавливает пропорциональность между электрохимическим и химическим эквивалентами.

Пользуясь вторым законом Фарадея, можно вычислить электрохимический эквивалент вещества.

Пример 2. Вычислить электрохимический эквивалент цинка, если атомный вес его 65.37, а валентность 2.

$$A = 65{,}37;$$
$$n = 2;$$
$$\alpha = ?$$

$$\text{Химический эквивалент } m = \frac{A}{n} = \frac{65{,}37}{2} = 32{,}68;$$

$$\alpha = 0{,}01036 \cdot 32{,}68 = 0{,}3387$$

Второй закон Фарадея показывает, от каких свойств вещества зависит величина его электрохимического эквивалента:

$$\alpha = 0{,}01036 \frac{A}{n}.$$

Из химии известно, что грамм-эквивалентом вещества называется число граммов, равное химическому эквиваленту этого вещества. Так, например, химический эквивалент серебра 107,88. Грамм-эквивалент серебра 107,88 *г*.

Если 1 *к* электричества, протекающий через раствор азотнокислого серебра, выделяет 1,118 *мг* серебра, то для того чтобы выделить не 1,118 *мг*, а 107,88 *г*, нужно не 1 *к*, а $107{,}88 \cdot 1000 : 1{,}118 = 96\,500$ *к*. То же количество электричества необходимо, чтобы выделить 1,008 *г* водорода, 29,34 *г* никеля, 9,03 *г* алюминия и т. д. Следовательно, чтобы выделить при электролизе один грамм-эквивалент любого вещества, нужно 96 500 *к*. Это число носит название числа Фарадея. Путем разнообразных опытов установлено, что в грамм-эквиваленте любого одиовалентного вещества заключается $6{,}06 \cdot 10^{23}$ атомов. Таким образом, 1,008 *г* водорода и 107,88 *г* серебра содержат одинаковое число атомов. В грамм-эквиваленте двухвалентного вещества атомов вдвое меньше, трехвалентного — втрое меньше, чем в атоме одновалентного вещества.

Если для выделения одного грамм-эквивалента вещества необходимо 96 500 *к*, а в каждом грамм-эквиваленте содержится $6{,}06 \cdot 10^{23}$ атомов, то каждый атом вещества несет с собой заряд:

$$e = \frac{96\,500}{6{,}06 \cdot 10^{23}} = 16 \cdot 10^{-20} \text{ к}.$$

Нейтральная молекула поваренной соли (NaCl), попадая в раствор, будет разлагаться на положительный ион натрия Na с зарядом $+e = 16 \cdot 10^{-20}$ *к* и отрицательный ион хлора Cl с зарядом $-e = 16 \cdot 10^{-20}$ *к*. Молекула хлористого цинка $ZnCl_2$ будет диссоциировать на отрицательно заряженную группу двух атомов хлора с зарядом $-2e = 2 \cdot 16 \cdot 10^{-20}$ *к* и положительно заряженный ион цинка с зарядом $+2e = 2 \cdot 16 \cdot 10^{-20}$ *к*.

Ион водорода, потерявший один электрон, будет обладать положительным зарядом $e = 16 \cdot 10^{-20}$ *к*. Поэтому число $16 \cdot 10^{-20}$ *к*

представляет собой элементарный электрический заряд, величину заряда электрона или протона.

Каждый *n*-валентный элемент, превращаясь в ион, теряет или приобретает *n* электронов. Таким образом, явление электролиза подтверждает справедливость электронной теории.

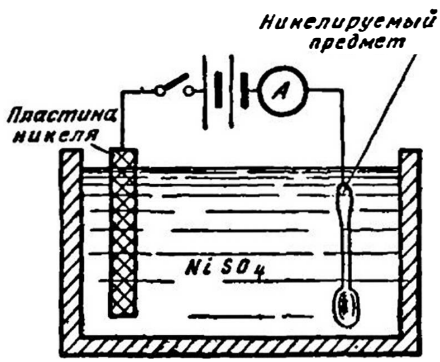
§ 40. Техническое применение электролиза

Электролиз нашел широкое применение в технике, например:

1. Покрытие металлов слоем другого металла при помощи электролиза (гальваностегия).

Для предохранения металлов от окисления, а также для придания изделиям прочности и лучшего внешнего вида их покрывают тонким слоем благородных металлов (золото, серебро) или мало окисляющимися металлами (хром, никель).

Предмет, предназначенный к гальваническому покрытию, тщательно очищают, полируют и обезжиривают, после чего погружают в качестве катода в гальваническую ванну. Электролитом является раствор соли металла, которым осуществляется покрытие. Анодом служит пластина из того же металла. На фиг. 53 изображена ванна для никелирования. Электролитом служит водный раствор вещества, содержащего никель (например, сернокислый никель $NiSO_4$), катодом является предмет, подвергающийся покрытию. Ток, пропускаемый через ванну, должен соответствовать величине покрываемой поверхности. Обычно при никелировании берут плотность тока, равную 0,4 *а/дм*^{2}. Для равномерного покрытия предмета его помещают между двумя анодными пластинами. После покрытия предмет вынимают из ванны, сушат и полируют.



Фиг. 53. Гальваностегия

2. Получение копий с предметов при помощи электролиза (гальванопластика).

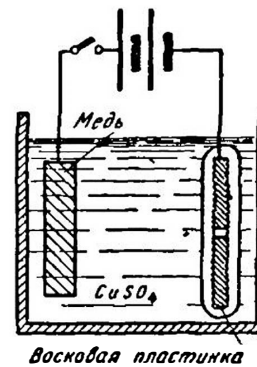
Для получения копий с металлических предметов (монет, медалей, барельефов и т. п.) делают слепки из какого-нибудь пластичного материала (например, воска). Для придания слепку электропроводимости его покрывают графитовой пылью, погружают в ванну в качестве катода и получают на нем слой металла нужной толщины. Затем путем нагревания удаляют воск.

Производство патефонных пластинок (фиг. 54) основано на применении гальванопластики. Восковая пластина с нанесенной на ней записью, опыленная для электропроводимости золотом, погружается в раствор медного купороса в качестве катода. Медный анод поддерживает концентрацию раствора постоянной. Полученный металлический рельефный негативный отпечаток служит для штампования из нагретой щеллачной массы большого числа патефонных пластинок.

Гальванопластика применяется во многих отраслях промышленности, в том числе в полиграфии. Процесс гальванопластики был разработан в 1836 г. русским академиком Борисом Семеновичем Якоби (1801—1874). Б. С. Якоби известен своими многочисленными работами в области электротехники. Он является изобретателем первого электродвигателя с непосредственным вращением вала, коллектора для выпрямления тока, стрелочного и электромагнитного пишущих телеграфных аппаратов, а также первого в мире буквопечатающего телеграфного аппарата; им открыто появление обратной э. д. с. при вращении якоря двигателя, впервые (в 1838 г.) осуществлено движение лодки при помощи электрической энергии.

Якоби созданы приборы для измерения электрического сопротивления, изготовлен эталон сопротивления, сконструирован вольтметр.

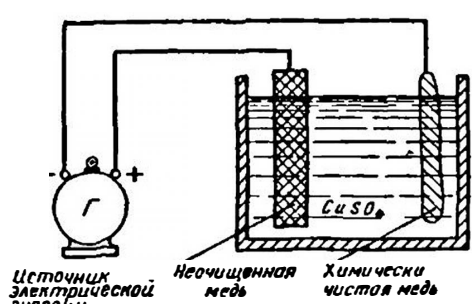
Якоби был членом Петербургской Академии Наук.



Фиг. 54. Гальванопластика

3. Рафинирование (очистка) металлов.

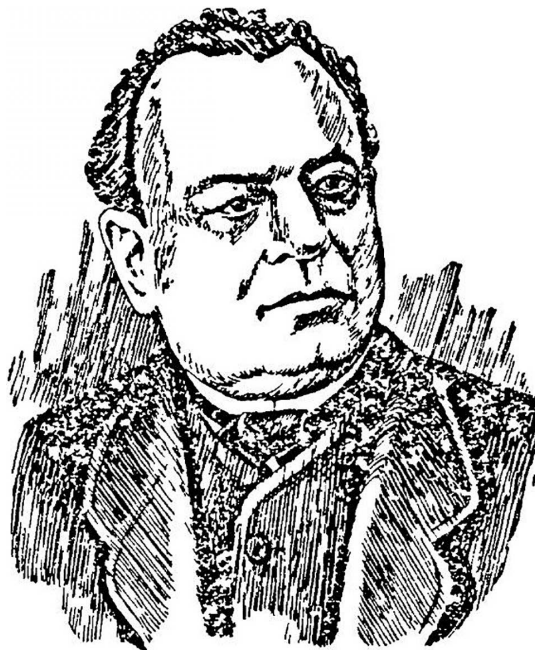
В электротехнике вследствие хорошей электропроводимости наибольшее применение как проводниковый материал имеет медь. Медные руды, кроме меди, содержат много примесей, как,



Фиг. 55. Рафинирование меди

например, железо, серу, сурьму, мышьяк, висмут, свинец, фосфор и т. п. Процесс получения меди из руды заключается в следующем. Руду измельчают и обжигают в особых печах, где некоторые примеси выгорают, а медь переходит в окись меди, которую

снова плавят в печах вместе с углем. Происходит восстановительный процесс, и получают продукт, называемый черной медью с содержанием меди 98—99%. Медь, идущая на нужды электротехники, должна быть наиболее чистой, так как всякие примеси уменьшают электропроводность меди. Такая медь получается из черной меди путем рафинирования ее электрическим способом.



Б. С. Якобн

Неочищенная медь подвешивается в качестве анода в ванну с раствором медного купороса (фиг. 55). Катодом служит лист чистой меди. При пропускании через ванну электрического тока медь с анода переходит в раствор, а оттуда осаждается на катод. Электролитическая медь содержит до 99,95% меди. Медь в электротехнике применяется для изготовления голых и изолированных проводов, кабелей сильного и слабого тока, обмоток электрических машин и трансформаторов, медных полос, лент, прутков, коллекторных пластин, деталей машин и аппаратов.

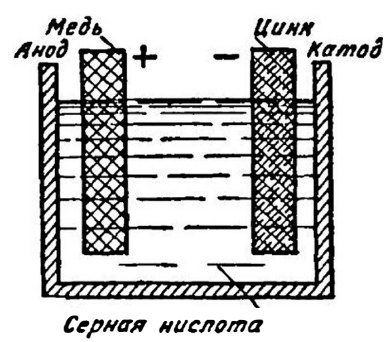
Второе место после меди в электротехнике занимает алюминий. Сырьем для получения алюминия служат бокситы, состоящие из окиси алюминия (до 70%), окиси кремния и окиси железа. В результате обработки бокситов щелочью получается продукт, называемый глиноземом (Al_2O_3).

Глинозем с некоторыми добавлениями (для снижения температуры плавления) загружается в огнеупорную печь, стенки и дно которой выложены угольными пластинами, соединенными с отрицательным полюсом источника напряжения. Через крышку печи проходит угольный стержень, который служит анодом. Сначала опускают угольный анод, в результате чего возникает электрическая дуга, которая расплавляет глинозем. В дальнейшем происходит электролиз расплавленной массы. Чистый алюминий скапливается на дне сосуда, откуда его выливают в формы. Процентное содержание алюминия в металле достигает 99,5%. Для получения алюминия требуется большое количество электроэнергии. Поэтому алюминиевые заводы строятся около больших гидроэлектростанций с дешевой электроэнергией (Волховская ГЭС, Днепрогэс и др.).

Алюминий в электротехнике употребляется для изготовления проводов, кабелей, получения сплавов.

§ 41. Гальванические элементы

Гальванические элементы являются источниками постоянного электрического напряжения и называются первичными элементами. Электрическая энергия, получаемая в этом случае, образуется за счет химических реакций, происходящих внутри элемента. Рассмотрим принцип действия простейшего гальванического элемента. Элемент (фиг. 56) состоит из сосуда с раствором серной кислоты (H_2SO_4), в которую погружены две пластины: цинковая и медная. Как показал опыт, цинк в этом случае заряжается отрицательно, а медь — положительно. Элемент имеет два вывода — полюса: положительный (анод) и отрицательный (катод).



Фиг. 56. Простейший гальванический элемент

Цинковая пластина, опущенная в раствор серной кислоты, будет растворяться в ней. Способность цинка легко отдавать свои электроны приводит к тому, что атом цинка, оставляя два своих электрона пластине (двухвалентный металл), переходит в раствор в виде положительного иона. Между цинковой пластиной и раствором возникает некоторая разность потенциалов, которая приостанавливает дальнейшее растворение цинковой пластины. Если опустить в раствор серной кислоты вторую цинковую пластину, то с ней произойдет то же, что с первой пластиной. Потенциал обе-

них пластин будет одинаков, а разность потенциалов между ними будет равна нулю. Опустим в раствор медную пластину. Обладая меньшей способностью растворения, медь по отношению к раствору будет иметь иную разность потенциалов, чем цинк. Теперь между медной и цинковой пластинами образуется разность потенциалов.

Разность потенциалов (э. д. с.). между пластинами (электродами) равна 1,1 *в*.

При замыкании полюсов элемента металлическим проводником электроны цинковой пластины будут переходить на медную пластину. Вследствие потери электронов потенциал между цинковой пластиной и раствором уменьшается и новая порция ионов цинка перейдет с пластины в раствор, причем сама пластина вновь обогащается электронами. Положительные ионы цинка, попав в раствор, соединяются с отрицательными ионами кислотного остатка SO_4^{--} и образуют молекулу цинкового купороса $ZnSO_4$.

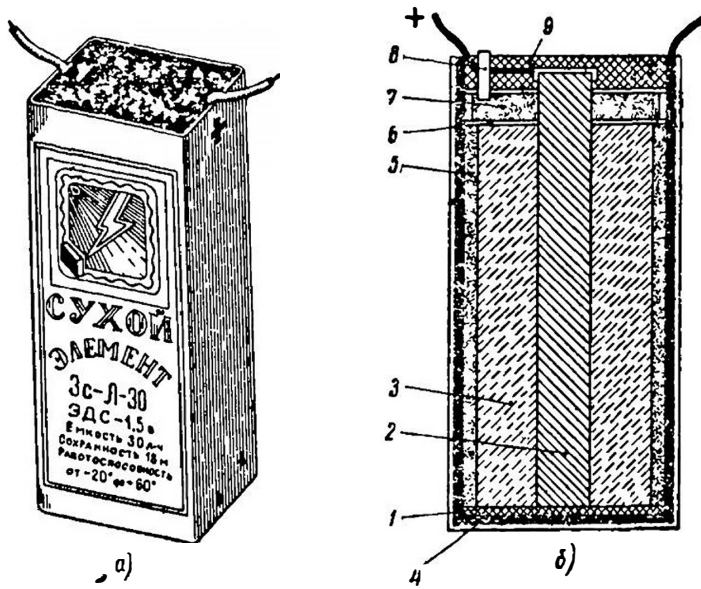
Положительный ион водорода H_2^{++}, подходя к медной пластине, берет у нее свободные электроны и, нейтрализуясь, выделяется в виде пузырьков, покрывая медную пластину. В результате работы элемента цинковая пластина, растворяясь в кислоте, пополняется электронами, а медная пластина, отдавая электроны, сохраняет положительный заряд и покрывается пузырьками водорода. Во внешней части цепи происходит движение электронов от цинковой пластины к медной, внутри электролита отрицательные ионы движутся от меди к цинку, а положительные ионы — от цинка к меди. Показания амперметра, включенного в цепь работающего медно-цинкового элемента, быстро уменьшаются. Это объясняется тем, что медная пластина совместно с водородом, который покрывает эту пластину, образует своеобразную гальваническую пару, своего рода особый элемент, э. д. с. которого направлена против э. д. с. самого элемента. Это явление носит название п о л я р и з а ц и и. Вследствие сильной поляризации медно-цинковый элемент не нашел себе применения на практике. К числу неполяризующихся элементов относится угольно-цинковый элемент. В качестве электродов у него служат угольная и цинковая пластины, электролитом — раствор нашатыря (NH_4Cl). Угольный стержень опущен в мешочек с перекисью марганца (MnO_2), которая устраняет поляризацию и называется д е п о л я р и з а т о р о м. Э. д. с. элемента 1,45 *в*. Во время работы угольно-цинкового элемента водород, выделяющийся из раствора, вступает в реакцию с перекисью марганца:

$$MnO_2 + 2H = MnO + H_2O,$$

в результате чего получается вода и поляризация элемента не происходит.

Часто угольно-цинковые элементы выполняются в виде так называемых сухих элементов.

На фиг. 57 изображен сухой элемент с марганцевой деполяризацией. Элемент помещен в цинковую коробку *1*, которая одновременно является отрицательным полюсом элемента. Коробка сверху оклеена картоном. В середине коробки находится угольный стержень *2*, являющийся положительным полюсом элемента. Вокруг угольного стержня расположен агломерат — деполяризатор *3*, состоящий из размолотых зерен перекиси мар-



Фиг. 57. Угольно-цинковый элемент с деполяризатором:
а — внешний вид сухого элемента, *б* — разрез сухого элемента

ганца, графита и сажи, замоченных в растворе нашатыря. Деполяризатор помещается в мешочке из миткаля. Для изоляции деполяризатора от цинка на дно цинковой коробки положена картонная прокладка *4*.

Снаружи мешочек с деполяризатором окружен пастой *5*, состоящей из дешевых сортов муки, пропитанной раствором нашатыря. Для предохранения пасты от загнивания и высыхания в ее состав вводят хлористый цинк. Вверху мешочек с деполяризатором прикрывают картонной прокладкой *6*, поверх которой насыпают слой опилок *7*, прикрытый также картонной прокладкой.

От цинковой коробки и угольного стержня делаются два отвода. Для отвода газов, образующихся во время работы элемента, в верхней части его располагают стеклянную трубку *8*. Верхнюю часть элемента заливают смолой *9*.

Сухие элементы с марганцевой деполяризацией имеют э. д. с. 1,4—1,6 *в* и внутреннее сопротивление 0,1—0,5 *ом*.

Количество электричества в ампер-часах, которое может отдать элемент при определенных условиях разряда, называется емкостью элемента. Испытания первичных элементов показывают, что емкость их зависит:

1) от величины разрядного тока: чем больше разрядный ток, тем меньшую емкость можно получить от элемента;

2) от режима работы элемента (непрерывный, с перерывами);

3) от температуры: чем ниже температура, тем меньше емкость элемента;

4) от величины напряжения, до которого пронзводится разряд.

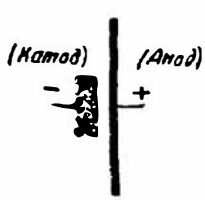
Обозначения сухих элементов с марганцевой деполяризацией: С — сухой; Л — летний (работа от —20 до +60°); Х — хладостойкий (работа от —40 до +40°); У — универсальный (работа от —40 до +60°).

Первые цифры 1—4 показывают размер элемента; буквы определяют характеристику элемента; последние цифры показывают емкость в ампер-часах.

Например, 3СЛ-30 означает: элемент третьего размера, сухой, летний, емкостью 30 *а·ч*.

Кроме элементов с марганцевой деполяризацией, наша промышленность выпускает сухие элементы с марганцево-воздушной деполяризацией (СМВД). Деполяризатор этих элементов состоит из смеси графита, активированного угля и марганцевой руды.

В отличие от элементов с марганцевой деполяризацией у элементов СМВД верхняя часть деполяризатора остается необвязанной и прикрыта сверху картоном. Такая конструкция элемента позволяет деполяризатору при помощи стеклянных трубок сообщаться с наружным воздухом. Таким образом, деполяризация у этих элементов происходит как за счет марганца, так и за счет кислорода воздуха. Емкость элементов СМВД почти в два раз больше емкости элементов с марганцевой деполяризацией. Во время работы элементов СМВД через стеклянные трубки идет испарение электролита. Для восстановления работы элемента через стеклянные трубки наливают раствор нашатыря (около 20 *см*³ на один элемент). Элементы с марганцево-воздушной деполяризацией выпускаются двух типов: 3СМВД (начальная емкость 45 *а·ч*, номинальный разрядный ток 50 *ма*) и 6СМВД (начальная емкость 150 *а·ч*, номинальный разрядный ток 150 *ма*).



Фиг. 58. Условное изображение химических источников напряжения

Для питания цепи накала радиоламп наша

промышленность выпускает сухие батареи БНС-100 (батарея накальная сухая, емкость 100 *а·ч*, начальная э. д. с. 1,5 *в*, максимальный разрядный ток 150 *ма*, состоит из 12 сухих элементов) и БНС-МВД-500 (состоит из 4 элементов типа 6СМВД, э. д. с. 1,4 *в*, емкость 500 *а·ч*).

Для питания цепи анода радиоламп служат анодные батареи. Чаще всего встречаются батареи БАС (батарея анодная сухая). Сухие элементы применяются также для питания цепей сигнализации, телефонии, карманных фонарей (тип КБС) и т. д.

Гальванические элементы и другие химические источники энергии на схемах условно обозначают как показано на фиг. 58.

§ 42. Электрические аккумуляторы

Для питания цепей управления, приборов защиты (реле), сигнализации, автоматики, аварийного освещения, приводов и держащих катушек быстродействующих выключателей, вспомогательных механизмов на электрических станциях и подстанциях должен находиться такой источник электрической энергии, работа которого не зависела бы от состояния основных агрегатов электростанции или подстанции. Этот источник энергии обязан обеспечить бесперебойную и четкую работу указанных цепей как при нормальной работе установки, так и при аварии.

Таким источником энергии на электростанциях и подстанциях является аккумуляторная батарея. Своевременно заряженная батарея, обладающая большой емкостью, может питать токоприемники в течение всего времени аварии.

Аккумуляторы применяются также для освещения автомобилей, железнодорожных вагонов, движения электрокар и подводных лодок, для питания радиоустановок и различных приборов, в лабораториях и для других целей.

Аккумулятор является вторичным источником электрического напряжения, так как он в отличие от гальванических элементов может отдавать энергию лишь после предварительного заряда. Гальванические элементы дают энергию без предварительного заряда и поэтому они были выше названы первичными элементами. Заряд аккумуляторов состоит в том, что его подключают к источнику постоянного напряжения. В результате процесса электролиза химическое состояние пластин аккумулятора меняется и между ними устанавливается определенная разность потенциалов.

Аккумуляторная батарея комплектуется из некоторого количества свинцовокислотных или щелочных аккумуляторов.

§ 43. Свинцовокислотные аккумуляторы

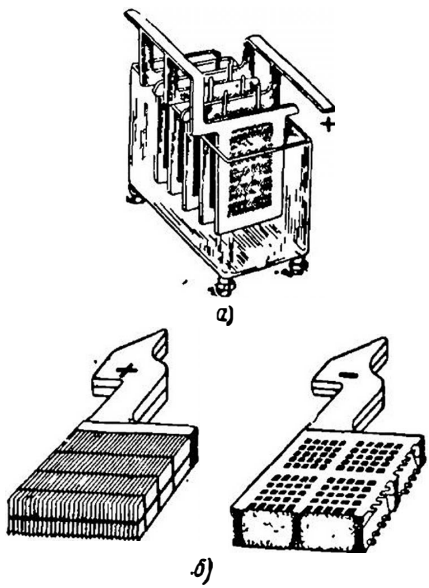
Свинцовокислотный аккумулятор состоит из нескольких положительных и отрицательных пластин, опущенных в сосуд

с электролитом. Электролитом служит раствор серной кислоты в дистиллированной воде. Удельный вес раствора 1,08—1,21.

Пластины аккумулятора бывают поверхностные и массовые.

Поверхностные пластины изготовляются из чистого свинца. Для увеличения площади поверхности пластин их делают ребристыми.

Массовые пластины представляют собой свинцовую решетку, в ячейки которой вмазывают окислы свинца (свинцовый глет, сурик). Для предупреждения выпадания массы из ячеек пластину с обеих сторон покрывают свинцовыми листами с отверстиями. Обычно положительную пластину аккумулятора изготовляют поверхностной, а отрицательную — массовой.



Фиг. 59. Свинцовокислотный аккумулятор:
а — внешний вид, *б* — пластины аккумулятора

Отдельные положительные пластины, так же как и отрицательные пластины, спаиваются в два изолированных один от другого блока. Для того чтобы положительные пластины могли работать с двух сторон, их берут на одну больше, чем отрицательных.

Сосуды свинцовокислотных аккумуляторов изготовляют из стекла, дерева, обитого внутри свинцовыми листами, керамики, эбонита, пластмассы.

При изготовлении пластин на аккумуляторных заводах их подвергают специальной электрохимической обработке (формовке), в результате чего на положительных пластинах образуется перекись свинца PbO_2, а на отрицательных пластинах — чистый (губчатый) свинец Pb. По цвету пластин можно определить их полярность: положительные пластины имеют красновато-коричневый цвет, отрицательные — серый цвет.

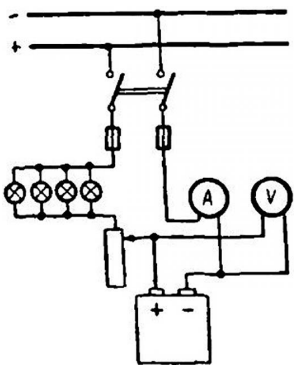
На фиг. 59 показан внешний вид свинцовокислотного аккумулятора и его пластин.

Реакции, происходящие при разряде и заряде кислотного аккумулятора, могут быть представлены одним общим уравнением:

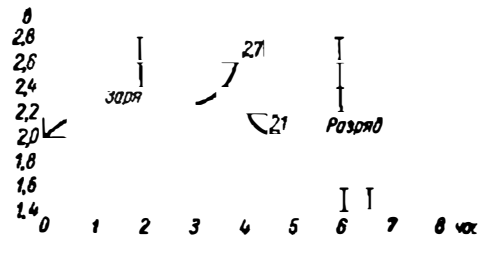
$$PbO_2 + 2H_2SO_4 + Pb \underset{\text{заряд}}{\overset{\text{разряд}}{\rightleftarrows}} 2PbSO_4 + 2H_2O.$$

Уравнение нужно читать слева направо при разряде и справа налево при заряде аккумулятора.

Для заряда аккумулятора его подключают к источнику постоянного напряжения (двигатель-генератору, выпрямителю) и, меняя напряжение, поддерживают зарядный ток постоянным

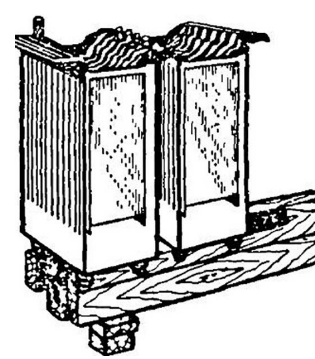


Фиг. 60. Схема заряда аккумулятора



Фиг. 61. График заряда и разряда кислотного аккумулятора

по величине (фиг. 60). Зарядный ток ие должен превышать величину максимального зарядного тока аккумулятора, указанную в паспорте. При напряжении на элементе 2,3—2,4 *в* начинается заметное газовыделение на пластинах. После этого величину зарядного тока уменьшают на 50—60% и, продолжая заряд, постепенно увеличивают напряжение на элементах до 2,5—2,7 *в*.



Фиг. 62. Внешний вид аккумуляторной батареи

На фиг. 61 даны кривые заряда и разряда кислотного аккумулятора. По кривой разряда видно, что, как только заряженный аккумулятор отключается от зарядного устройства, напряжение на его зажимах быстро падает с 2,7 до 2,1 *в*. При разряде аккумулятора его напряжение после 1,9 *в* уменьшается медленно, а до 1,8 *в* — быстро. Разряжать аккумулятор ниже напряжения 1,75—1,8 *в* нельзя во избежание его порчи, так как окись свинца пластин (PbO), соединяясь с серной кислотой (H_2SO_4), дает труднорастворимый крупнозернистый сернокислый свинец-сульфат и воду:

$$PbO + H_2SO_4 = PbSO_4 + H_2O,$$

что сильно понижает плотность раствора аккумулятора и затрудняет протекание химических реакций. Переход активной массы пластин в крупнозернистый сульфат называется сульфатацией. При работе аккумулятора имеют место потери энергии на саморазряд. Саморазряд вызывается случайными примесями в электролите, что порождает дополнительные химические реакции и потерю энергии. Внутреннее сопротивление свинцовокислотного аккумулятора невелико. Оно составляет около 0,001 *ом* для заряженного аккумулятора и увеличивается к концу разряда примерно в два раза.

К. п. д. свинцовокислотного аккумулятора составляет 75—84%.

На фиг. 62 показан внешний вид аккумуляторной батареи.

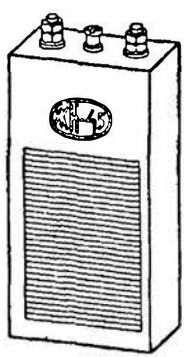
§ 44. Щелочные аккумуляторы

В целях экономии свинца на электростанциях и подстанциях вместо кислотных аккумуляторов стали применяться щелочные аккумуляторы.

Щелочные аккумуляторы бывают двух типов: кадмиево-никелевые (типа КН) и железо-никелевые (типа ЖН).

Активной массой положительных пластин для обоих типов щелочных аккумуляторов является гидрат окиси никеля. Для отрицательных пластин аккумуляторов КН активной массой является смесь кадмия с железом, а для ЖН — химически чистое железо.

Пластины щелочных аккумуляторов представляют собой стальные никелированные рамки с ячейками, в которые помещают пакетики из тонкой (0,1 *мм*) никелированной перфорированной стали. В пакетики запрессовывается активная масса. В аккумуляторах ЖН число отрицательных пластин на единицу больше, чем положительных, и блок отрицательных пластин соединен с корпусом сосуда.



Фиг. 63. Внешний вид щелочного аккумулятора

В аккумуляторах КН число положительных пластин на единицу больше, чем отрицательных, и корпус сосуда соединен с блоком положительных пластин.

Сосудом щелочных аккумуляторов служит стальная сваренная коробка, в крышке которой имеются три отверстия: два для вывода зажимов и одно для заливки электролита и выхода газов.

Электролитом щелочных аккумуляторов является раствор едкого калия КОН с удельным весом 1,18—1,20.

На фиг. 63 показан внешний вид щелочного аккумулятора.

При разряде железо-никелевого аккумуля-

эра гидраты высших окислов на положительной пластине переходят в гидраты низших окислов, а хнмически чистое железо на трицательной пластине — в гидраты окислов железа.

При заряде аккумулятора химические реакции происходят обратном направлении. Уравнение реакции разряда-заряда меет следующий вид:

$$2Ni(OH)_3 + 2KOH + Fe \underset{\text{заряд}}{\overset{\text{разряд}}{\rightleftarrows}} 2Ni(OH)_2 + 2KOH + Fe(OH)_2.$$

Реакции разряда-заряда для кадмиево-никелевого аккумулятора имеют следующий вид:

$$2Ni(OH)_3 + 2KOH + Cd \underset{\text{заряд}}{\overset{\text{разряд}}{\rightleftarrows}} 2Ni(OH)_2 + 2KOH + Cd(OH)_2.$$

В начале заряда щелочного аккумулятора на один элемент подают около 1,55 *в*, затем напряжение постепенно увеличивают и доводят его в конце заряда до 1,75—1,8 *в*.

Напряжение заряженного щелочного аккумулятора, отключенного от зарядного агрегата, составляет 1,25—1,3 *в*.

Разряжать щелочной аккумулятор можно только до напряжения 1,0—1,1 *в*. При понижении температуры против нормальной (+25°) емкость щелочных аккумуляторов уменьшается на 0,5% на каждый градус понижения температуры.

Щелочные аккумуляторы имеют следующие преимущества перед свинцовокислотными:

1) при их изготовлении не употребляется дефицитный свинец;

2) они обладают большой выносливостью и механической прочностью — не боятся сильных токов разряда, тряски, ударов и даже коротких замыканий;

3) при длительном бездействии несут малые потери на саморазряд и не портятся, имеют большой срок службы;

4) при работе выделяют меньшее количество вредных газов и испарений;

5) имеют меньший вес, чем свинцовокислотные;

6) менее требовательны в отношении постоянного квалифицированного ухода.

Недостатки щелочных аккумуляторов по сравнению со свинцовокислотными:

1) меньшая э. д. с.;

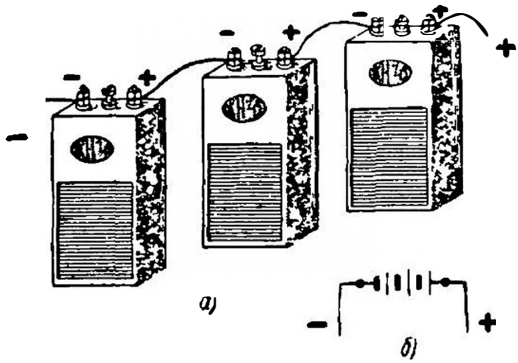
2) более низкий к. п. д. (52—55%);

3) более высокая стоимость.

§ 45. Соединение источников э. д. с.

Источники э. д. с. (аккумуляторы, элементы) включаются между собой последовательно, параллельно и смешанно.

1. Последовательное соединение источников э. д. с. На фиг. 64, *а* представлено последовательное соединение трех аккумуляторов. Такое соединение аккумуляторов, когда минус каждого предыдущего элемента соединен с плюсом последующего элемента, называется последовательным соединением. Группа соединенных между собой аккумуляторов называется батареей.



Фиг. 64. Последовательное соединение аккумуляторов

Схематически последовательное соединение трех аккумуляторов в батарею показано на фиг. 64, *б*. Так как э. д. с. аккумуляторов в этом случае направлены в одну сторону, э. д. с. всей батареи равна их сумме:

$$E = E_1 + E_2 + E_3.$$

Внутреннее сопротивление батареи равно сумме внутренних сопротивлений отдельных аккумуляторов:

$$r_0 = r_{01} + r_{02} + r_{03}.$$

Если батарея окажется замкнутой на внешнее сопротивление r, то ток в цепи будет найден по формуле:

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{r_{01} + r_{02} + r_{03} + r}$$

Последовательно соединяют аккумуляторы в том случае, когда напряжение потребителя выше э. д. с. одного аккумулятора, а ток потребителя имеет величину, не превышающую разрядный ток аккумулятора.

Практически приходится соединять между собой в батареи только однотипные аккумуляторы, т. е. имеющие одинаковые э. д. с., внутренние сопротивления и емкость.

В этом случае э. д. с. батареи, состоящей из n аккумуляторов, равна:

$$E_{бат} = En.$$

Внутреннее сопротивление батареи

$$r_0 = r_{01}n.$$

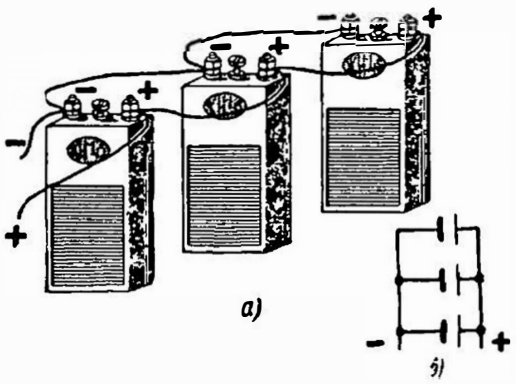
Ток батареи, замкнутой на внешнее сопротивление, будет:

$$I = \frac{En}{r_{01}n + r}.$$

Пример 3. Батарея из пяти аккумуляторов с э. д. с. по 1,2 *в* и внутренним сопротивлением по 0,2 *ом* замкнута на внешнее сопротивление 11 *ом*. Определить ток, отдаваемый батареей в сеть.

$$I = \frac{En}{r_{01}n + r} = \frac{1{,}2 \cdot 5}{0{,}2 \cdot 5 + 11} = 0{,}5\ а.$$

2. Параллельное соединение источников э. д. с. Если плюсы нескольких аккумуляторов соединить между собой и вывести общий плюс, а минусы этих же аккумуляторов также соединить между собой и вывести общий минус, то такое соединение будет называться параллельным соединением. На фиг. 65, *а* представлено параллельное соединение трех аккумуляторов, а на фиг. 65, *б* дана схема того же соединения.



Фиг. 65. Параллельное соединение аккумуляторов

Обязательным условием для параллельного соединения аккумуляторов является равенство их э. д. с., внутренних сопротивлений и емкостей, так как иначе между аккумуляторами будут протекать уравнительные токи, вредные для батареи.

Э. д. с. батареи при параллельном соединении равна э. д. с. одного аккумулятора:

$$E_{бат} = E_1 = E_2 = E_3 = \dots E_n.$$

Но так как каждый аккумулятор создает ток в одном направлении, то батарея в целом может отдать в сеть ток больший, чем каждый аккумулятор в отдельности.

Внутреннее сопротивление батареи, состоящей из n параллельно включенных аккумуляторов, будет и в n раз меньше сопротивления каждого аккумулятора:

$$r_0 = \frac{r_{01}}{n}.$$

Ток, отдаваемый батареей в сеть, будет:

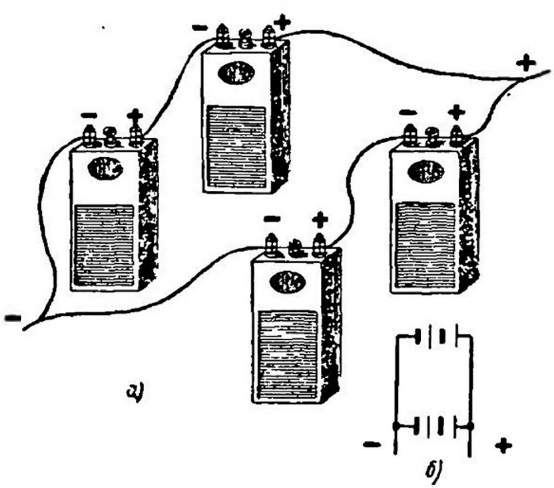
$$I = \frac{E}{\frac{r_{01}}{n} + r}.$$

Параллельное соединение аккумуляторов применяется в том случае, когда напряжение потребителя равно э. д. с. аккумулятора, а ток, необходимый потребителю, больше разрядного тока одного аккумулятора.

Пример 4. Определить ток, отдаваемый в сеть батареей, состоящей из двух параллельно включенных аккумуляторов, если э. д. с. каждого аккумулятора равна 2 *в*, а внутреннее сопротивление — 0,02 *ом*. Внешнее сопротивление равно 1,99 *ом*.

$$I = \frac{E}{\frac{r_{01}}{n} + r} = \frac{2}{\frac{0{,}02}{2} + 1{,}99} = 1\ a.$$

3. Смешанное соединение источников э. д. с. Комбинируя последовательное и параллельное соединения, мы получим смешанное соединение аккумуляторов. На фиг. 66, *а* представлено смешанное соединение четырех аккумуляторов из двух параллельных групп по два элемента в каждой группе, а на фиг. 66, *б* дана схема этого соединения. Э. д. с. батарен со смешаниым соединением аккумуляторов равна сумме э. д. с. элементов, последовательно включеиных в каждую группу (n).



Фиг. 66. Смешанное соединение аккумуляторов

$$E_{бат} = En.$$

Внутреннее сопротивление аккумуляторов в группе

$$r_{0_{гр}} = r_{01}n.$$

Внутреннее сопротивление батареи, состоящей из m групп,

$$r_{об} = \frac{r_{0_{гр}}}{m} = \frac{r_{01}n}{m}.$$

Ток, отдаваемый батареей в сеть сопротивлением r *ом*,

$$I = \frac{E_{бат}}{r_{об} + r} = \frac{En}{\frac{r_{01}n}{m} + r}.$$

Смешанное соединение аккумуляторов применяется в том случае, когда напряжение и ток потребителя больше э. д. с. и разрядного тока одного аккумулятора.

Пример 5. Имеется батарея, состоящая из двух групп аккумуляторов по три аккумулятора в группе. Батарея замкнута на сопротивление 1,65 *ом*, э. д. с. аккумулятора 1,2 *в*, внутреннее сопротивление 0,1 *ом*.

$$I = \frac{En}{\frac{r_{01}n}{m} + r} = \frac{1{,}2 \cdot 3}{\frac{0{,}1 \cdot 3}{2} + 1{,}65} = 2\ a.$$

Мы разобрали ряд случаев соединения источников э. д. с. Выясним теперь, какой способ соединения является наиболее экономичным с точки зрения максимальной отдачи мощности во внешней цепи. Математика дает ответ на этот вопрос. Оказывается, что для выделения во внешней цепи максимальной полезной мощности необходимо равенство сопротивлений внутренней и внешней части цепи:

$$r_0 = r.$$

Задачи для самостоятельного решения

1. Сколько *мг* цинка выделятся из раствора цинковой соли при прохождении через раствор 50 *к* электричества?
2. Через ванну с раствором медного купороса проходит ток 5 *а* в течение 20 мин. Определить количество выделенной из раствора меди.
3. При никелировании в качестве анода подвешена пластинка никеля весом 20 *г*. В какое время израсходуется никелевая пластинка, если через раствор проходит ток 10 *а*?
4. Металлическую пластинку площадью 2 $дм^2$ покрывают слоем цинка толщиной 0,05 *мм*. Сколько времени будет продолжаться покрытие, если ток равен 1 *а*, а удельный вес цинка 7,1?
5. Металлический предмет размером 10×40×60 *мм* покрывают серебром. Какой ток необходимо пропустить, чтобы покрыть предмет слоем серебра толщиной 0,01 *мм* в течение 0,5 часа? Удельный вес серебра 10,5.
6. Имеется батарея из четырех аккумуляторов с э. д. с. по 1,2 *в* и внутренним сопротивлением по 0,2 *ом*. Батарея замкнута на сопротивление 4 *ом*. Определить ток батареи в случае, если аккумуляторы соединены: а) последовательно, б) параллельно.
7. Четыре аккумулятора с э. д. с. по 1,2 *в* и внутренним сопротивлением по 0,3 *ом* включены последовательно. Внешнее сопротивление равно 8,4 *ом*. Определить показания амперметра и вольтметра по внешней части цепи.
8. Три параллельные группы аккумуляторов по пять последовательно включенных аккумуляторов в каждой группе работают на внешнюю сеть сопротивлением 4,995 *ом*, э. д. с. аккумулятора 2 *в*, внутреннее сопротивление 0,003 *ом*. Определить ток, напряжение и мощность батареи.

Контрольные вопросы

1. Что называется электролизом?
2. От чего зависит количество вещества, выделившегося на электродах при электролизе?
3. Что называется электрохимическим эквивалентом вещества?
4. В чем сущность первого и второго законов Фарадея?
5. Указать техническое применение электролиза.
6. Как устроен простейший гальванический элемент?
7. Как устроены и работают аккумуляторы?
8. Как соединяются между собой источники напряжения?

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ТЕПЛОВЫЕ ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

§ 46. Нагрев проводника электрическим током

Как известно, все тела состоят из молекул и эти молекулы не находятся в покое, а непрерывно движутся. Чем выше температура тела, тем быстрее движение молекул вещества этого тела. Но есть температура, при которой движение молекул прекращается. Температура эта равна минус 273° С. Абсолютный нуль — так называют ученые эту температуру. На земле такой температуры в естественных условиях нет. Получить температуру, близкую к ней, можно только в лабораториях.

В проводнике, по которому течет электрический ток, так же как и во всех телах, есть движение молекул. При наличии в проводнике электрического тока электроны сталкиваются с двигающимися молекулами проводника и усиливают их движение, что приводит к нагреву проводника.

Количество тепла измеряется в калориях (*кал*). Одной калорией называется такое количество тепла, которое необходимо для нагрева 1 *г* воды на 1° С. 1 *ккал* равна 1000 *кал*.

Пример 1. Сколько нужно тепла, чтобы нагреть до кипения 250 *г* воды, взятой при температуре 10°?

Рассуждаем так: для нагрева 1 *г* воды на 1° нужна 1 *кал* тепла. Для нагрева 250 *г* воды на 1° нужно 250 *кал*. Для нагрева 250 *г* воды от 10 до 100° (на 90°) нужно $250 \cdot 90 = 22\,500$ *кал* = 22,5 *ккал*.

§ 47. Закон Джоуля — Ленца

В результате опытов было установлено, что количество тепла, выделяемого током при прохождении по проводнику, зависит от сопротивления самого проводника, тока и времени его прохождения.

Этот физический закон был впервые установлен в 1841 г. английским физиком Джоулем, а несколько позднее (в 1844 г.) независимо от него русским академиком Эмилем Христиановичем Ленцем (1804—1865).

Количественные соотношения, имеющие место при нагревании проводника током, называются законом Джоуля — Ленца.

Э. Х. Ленц обобщил опыты по электромагнитной индукции, изложив это обобщение в виде «правила Ленца». В своих трудах по теории электрических машин Ленц изучил явление «реакции якоря» в машинах постоянного тока, доказал принцип обратимости электрических машин. Ленц, работая с Якоби, исследовал силу притяжения электромагнитов, установил зависимость магнитного момента от намагничивающей силы.



Э. Х. Ленц

Ленц был членом Петербургской Академии Наук и ректором Петербургского университета.

Выше было установлено:

$$1\ квт = \frac{1}{0{,}736}\ л.\ с. = 1{,}36\ л.\ с.,$$

откуда

$$1\ \frac{кГм}{сек} = \frac{1}{75}\ л.\ с. = \frac{736}{75}\ вт = 9{,}81\ вт = 9{,}81\ \frac{дж}{сек};$$

$$1\ дж = \frac{1\ кГм}{9{,}81} = 0{,}102\ кГм.$$

Так как $1\ кал = 0{,}427\ кГм$, то

$$1\ дж = \frac{0{,}102}{0{,}427}\ кал = 0{,}24\ кал.$$

Таким образом,

$$1\ дж = 0{,}24\ кал.$$

Энергия электрического тока определяется по формуле

$$A = I^2rt\ дж.$$

Так как энергия тока идет на нагрев, то количество тепла, выделяемое током в проводнике, равно:

$$Q = 0{,}24I^2rt\ кал.$$

Эта формула, выражающая закон Джоуля — Ленца, показывает, что количество тепла в калориях, выделяемое током при прохождении по проводнику, равно коэффициенту 0,24, умноженному на квадрат тока в амперах, сопротивление в омах и время в секундах.

Пример 2. Определить, сколько тепла выделит ток в 6 *а*, проходя по проводнику сопротивлением 2 *ом*, в течение 3 *мин*,

$$Q = 0{,}24 \cdot I^2 \cdot r \cdot t = 0{,}24 \cdot 36 \cdot 2 \cdot 180 = 3110{,}4\ кал.$$

Формулу закона Джоуля — Ленца можно написать так:

$$Q = 0{,}24 \cdot I \cdot I \cdot r \cdot t,$$

а так как $I \cdot r = U$, то можно написать:

$$Q = 0{,}24 \cdot I \cdot U \cdot t\ кал.$$

Пример 3. Электрическая плитка включена в сеть напряжением 120 *в*. Ток, протекающий по спирали плитки, 5 *а*. Требуется определить, сколько тепла выделит ток за 2 часа,

$$Q = 0{,}24 \cdot I \cdot U \cdot t = 0{,}24 \cdot 5 \cdot 120 \cdot 7200 = 1\,036\,800\ кал = 1036{,}8\ ккал.$$

§ 48. Температура нагрева проводника электрическим током

Все проводники при прохождении по ним электрического тока нагреваются и отдают тепло окружающей среде (воздуху, жидкости, твердому телу). Температура проводника будет повышаться до тех пор, пока количество тепла, получаемое проводником, не станет равным количеству тепла, отдаваемому проводником окружающей среде. Температура нагрева проводника зависит от тока в проводнике, сечения и материала проводника и условий охлаждения. При заданных токе и материале проводника температура его нагрева не зависит от длины его, так как чем больше длина, тем больше поверхность охлаждения.

Если выбрать проводник из определенного материала и поместить его в определенные условия охлаждения, то нагрев такого проводника током будет тем больше, чем больше плотность тока в самом проводнике.

В целях экономии материала стараются пропустить по проводнику наибольший ток, но для каждого проводника существует

температура, выше которой проводник нельзя нагревать по ряду причин. Так, например, проводники, имеющие в качестве изоляции резину и хлопчатобумажную оплетку, в целях предохранения изоляции от порчи не должны нагреваться выше 50°. Поэтому в зависимости от сечения проводники выбирают на определенную плотность тока. Например, наибольшая допустимая плотность тока для изолированных медных проводов и кабелей, проложенных не в земле, в зависимости от сечения, показана в табл. 10.

Таблица 10

Допустимая плотность тока для изолированных медных проводов

Сечение в *мм*²	Ток в *а*	Плотность тока в *а/мм*²	Сечение в *мм*²	Ток в *а*	Плотность тока в *а/мм*²
0,75	13	17,4	70	242	3,5
1	15	15,0	95	292	3,1
1,5	20	13,3	120	342	2,8
2,5	27	10,8	150	392	2,6
4	36	9,0	185	450	2,4
6	46	7,7	240	532	2,2
10	68	6,8	300	614	2,0
16	92	5,7	400	737	1,8
25	123	4,9			
35	152	4,3			
50	192	3,8			

Как видно из таблицы, плотность тока с увеличением сечения проводников уменьшается. Это объясняется тем, что проводники небольших сечений, нагреваясь, отдают свое тепло окружающей среде, в то время как внутренние слои проводника большего сечения, нагреваясь, свое тепло могут передать только соседним слоям проводника, которые сами уже нагреты.

Неизолированные («голые») провода благодаря лучшему охлаждению допускают большие величины плотности тока (табл. 11).

Таблица 11

Допустимая плотность тока для неизолированных проводов

Сечение в *мм*²	В закрытом помещении		На воздухе	
	ток в *а*	плотность тока в *а/мм*²	ток в *а*	плотность тока в *а/мм*²
4	57	14,2	58	14,5
6	73	12,2	76	12,6
10	103	10,3	108	10,8
16	130	8,1	150	9,4
25	165	6,6	205	8,2
35	210	6,0	270	7,7
50	265	5,3	335	6,7
70	340	4,8	425	6,1
95	410	4,3	510	5,4

Следует отметить, что если медный изолированный провод сечением 25 *мм*² допускает ток в 123 *а*, то сечение алюминиевого провода при том же токе нужно брать не 25 *мм*², а в 1,5 раза больше, так как иначе провод будет перегреваться вследствие большего удельного сопротивления алюминия.

Энергия электрического тока, расходуемая на нагревание проводов, теряется бесполезно. Поэтому при расчете проводов тепловые потери стараются свести не более чем к 5—10% от всей энергии.

Но не всегда нагрев проводника является нежелательным. Тепловые действия электрического тока имеют многочисленное практическое применение, и тепло, выделяемое током, проходящим по проводнику, часто стараются получить в большом количестве. Ниже описаны некоторые случаи практического применения тепловых действий тока.

§ 49. Электрические лампы накаливания

Лампа накаливания была изобретена русским ученым А. Н. Лодыгиным и впервые демонстрировалась им еще в 1873 г.

Александр Николаевич Лодыгин родился в 1847 г. в Тамбовской губ. Окончил кадетский корпус в Воронеже и Московское юнкерское училище. После военной службы вышел в отставку и посвятил свою жизнь изобретательству. В 1873 г. изобрел лампу накаливания и в том же году демонстрировал в Петербурге уличное освещение с помощью ламп накаливания с угольным стержнем. В дальнейшем А. Н. Лодыгин усовершенствовал лампу накаливания с металлическими нитями. Ему принадлежит приоритет в применении вольфрама для изготовления нити накаливания. В 1880 г., не получив в царской России материальной поддержки для производства опытов, А. Н. Лодыгин уехал во Францию, оттуда в США, где и умер в 1923 г.

Принцип действия лампы накаливания основан на сильном нагревании проводника (нити накаливания) при прохождении по нему электрического тока. При этом проводник начинает испускать, кроме тепловой, еще и световую энергию. Чтобы нить накаливания не перегорала, ее нужно поместить в стеклянную колбу, из которой выкачан воздух. Так устроены так называемые пустотные лампы. Первоначально в качестве нити накаливания применялась угольная нить, полученная прокаливанием растительных волокон. Лампы с такой нитью излучали слабый, желтоватый свет, потребляя большую мощность. Угольная нить, накаливаясь до температуры 1700°, постепенно выгорала, что приводило к сравнитель-



Фиг. 67. Лампа накаливания

но быстрой гибели лампы. Сейчас лампы с угольной нитью вышли из употребления.

Теперь в лампах накаливания вместо угольной нити употребляется нить, приготовленная из тугоплавких металлов осмия или вольфрама (фиг. 67). Вольфрамовая нить, накаливаясь в пустотных лампах до 2200°, испускает более яркий свет и потребляет меньшую мощность, чем угольная нить.



А. Н. Лодыгин

Выгоранне нити накаливаний уменьшается, если стеклянную колбу (баллон) лампы наполнить газом, не поддерживающим горения, например азотом или аргоном. Такие лампы получили название газополных. Температура нити при работе такой лампы достигает 2800°.

Наша промышленность выпускает осветительные лампы накаливания на напряжение 36, 110, 127 и 220 *в*. Для специальных целей лампы изготовляют и на другие напряжения.

Лампы накаливания имеют очень низкий коэффициент полезного действия. В них превращается в световую энергию только около 4—5% всей потребляемой лампой электрической энергии; остальная энергия превращается в тепло.

В настоящее время получили широкое распространение газосветные лампы. В них использовано свойство разреженных газов светиться при прохождении через них электрического тока. Свет, излучаемый газосветной лампой, зависит от природы газа. Неон дает красно-оранжевый, аргон — сине-фиолетовый, гелий — желтовато-розовый свет. Питание газосветных ламп осуществляется переменным током высокого напряжения, получаемого при помощи трансформаторов. Эти лампы нашли себе применение для устройства вывесок, реклам, иллюминации.



Фиг. 68. Схема включения люминесцентной лампы

Наша промышленность выпускает также лампы, в стеклянных трубках которых находятся разреженные ртутные пары. Пропусканием тока через них можно заставить пары слабо светиться.

Внутренняя поверхность трубки лампы покрыта специальным составом — люминофором, светящимся под действием свечения ртутных паров. Эти лампы получили название люминесцентных ламп.

В настоящее время выпускаются три вида люминесцентных ламп: лампы ДС (дневного света), применяемые для освещения мест, где необходимо различие цветов, — полиграфическая, хлопчатобумажная промышленность и т. п.; лампы БС (белого света) для освещения производственных, конторских и жилых помещений; лампы ТБ (теплобелого света) для освещения музеев, театров и картинных галерей. К. п. д. люминесцентных ламп в четыре раза больше, чем обычных ламп накаливания.

На фиг. 68 представлена схема включения в сеть люминесцентной лампы.

§ 50. Электрическая дуга

Если взять концы двух проводников, присоединенных к полюсам источника электрического напряжения, и сблизить их почти вплотную, то между концами проводников образуется искра. Вследствие плохого контакта концы проводников будут нагреваться, и если теперь развести их, то искра переходит в дугу (фиг. 69) и создает сильный, ослепительный свет.

Электрическая дуга была впервые получена русским академиком В. В. Петровым в 1802 г. В качестве проводников для получения дуги обычно берут угли, которые не плавятся при высокой температуре, развиваемой дугой. Температура электрической

дуги может достигать 3500° и в ее пламени плавится большинство самых тугоплавких веществ.

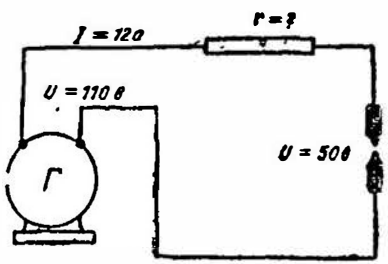
При питании электрической дуги постоянным током положительный уголь разрушается быстрее отрицательного, причем середина положительного угля, быстро сгорая, образует углубление (кратер). Поэтому положительный уголь при постоянном токе обычно берут в два раза толще отрицательного. При переменном токе толщина углей берется одинаковой. Если внутрь углей поместить стержни из солей некоторых металлов, то окраску света дуги можно изменить.



Фиг. 69. Электрическая дуга

При работе дуги концы углей обгорают и расстояние между ними увеличивается. Чтобы дуга не погасла, угли нужно постоянно сближать. Практически сближение углей производят или ручным регулятором (проекционные фонари) или автоматическим регулятором (прожекторы).

Первые автоматические регуляторы для электрической дуги, а также регуляторы, реагирующие на изменения тока или напряжения, были построены русским изобретателем В. Н. Чиколевым (1845—1898).



Фиг. 70. К примеру 4

Для спокойного и ровного горения дуги необходимо напряжение 40—60 *в* и ток 10—12 *а* и выше. Если источник напряжения, питающий электрическую дугу, имеет напряжение большее, чем нужно для дуги, то излишек напряжения гасится в добавочном сопротивлении, включаемом последовательно с дуговой установкой.

Пример 4. Определить величину добавочного сопротивления к дуговой лампе киноаппарата, которая требует напряжения 50 *в* и тока 12 *а*. Напряжение генератора 110 *в* (фиг. 70).

Падение напряжения в добавочном сопротивлении будет:

$$110 - 50 = 60 \text{ в}.$$

Падение напряжения 60 *в* в добавочном сопротивлении при токе 12 *а* может быть тогда, когда сопротивление

$$r = \frac{U}{I} = \frac{60}{12} = 5 \text{ ом}.$$

Электрическую дугу для целей освещения впервые применил известный русский ученый П. Н. Яблочков (1847—1894), создав «электрическую свечу».

Павел Николаевич Яблочков родился в 1847 г. в Саратовской губ. В 1886 г. окончил Николаевское инженерное училище в Петербурге. Занимался разработкой и распространением своей «свечи», предложил новую систему распределения электрического тока при помощи индукционных катушек.



П. Н. Яблочков

П. Н. Яблочков — основоположник применения переменного тока в практической электротехнике, изобретатель трансформатора и создатель термоэлектрического элемента. Он является также одним из основателей журнала «Электричество». П. Н. Яблочков долгое время жил за границей. Вернулся в Россию в 1893 г., а в 1894 г. умер в Саратове.

«Свеча» Яблочкова представляет собой два угля, поставленных рядом и разделенных прокладкой из обожженной глины (каолина). По мере сгорания углей прокладка плавится и расстояние между углями остается постоянным.

Благодаря сильной яркости и большой силе света электрическая дуга нашла себе применение в прожекторах, необходимых для освещения предметов, удаленных иногда на несколько километров.

Тепло, создаваемое электрической дугой, используют в дуговых печах. В этих печах удается расплавить большинство тугоплавких веществ.

§ 51. Электросварка

Электросварка бывает двух видов: 1) дуговая и 2) электросварка методом сопротивления.

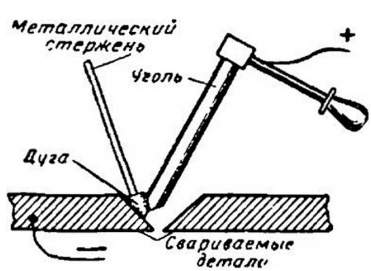
Дуговая электросварка изобретена русским инженером Н. Н. Бенардосом в 1882 г.

Николай Николаевич Бенардос (1842—1905), кроме электрической сварки и пайки металлов, изобрел способ электролитического покрытия медью корпусов железных судов. Н. Н. Бенардос является конструктором комбинированного газоэлектрического паяльника. Он впервые применил электрическую дугу для резки металлов под водой. Н. Н. Бенардос получил звание почетного инженера-электрика.

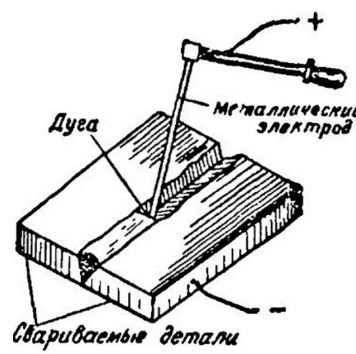
При дуговой электросварке используют тепло, выделяемое электрической дугой. При сварке по способу Бенардоса один полюс источника напряжения присоединяют к угольному стержню, а другой полюс — к деталям, которые необходимо сварить (фиг. 71). В пламя электрической дуги вводится тонкий металлический стержень, который плавится, и капли расплавленного металла, стекая на детали и застывая, образуют сварочный шов.

В 1891 г. русский инженер Н. Г. Славянов предложил другой способ дуговой электросварки, который и получил наибольшее распространение. Николай Гаврилович Славянов (1854—1897) работал на Воткинском заводе и в Мотовилихе (около г. Перми). В 1893 г. на Всемирной выставке Н. Г. Славянов получил золотую медаль за способ электросварки под слоем толченого стекла (флюса).

Электросварка по способу Славянова состоит в следующем. Угольный стержень заменен металлическим электродом



Фиг. 71. Электросварка по способу Бенардоса (с угольным электродом)



Фиг. 72. Электросварка по способу Славянова (с металлическим электродом)

(фиг. 72). Плавится сам электрод, и расплавленный металл, застывая, соединяет свариваемые детали. По использовании электрода его заменяют новым.

Прежде чем сваривать деталь, ее нужно тщательно очистить от ржавчины, окалины, масла, грязи с помощью зубила, напильника, шкурки.

Для создания устойчивой дуги и получения прочного шва металлические электроды обмазывают специальными составами. Такая обмазка во время плавления электрода при работе также плавится и, заливая сильно нагретые поверхности свариваемых деталей, не дает им окисляться.

Электросварка методом сопротивления. Если сложить вплотную два куска металла и пропустить по ним сильный электрический ток, то за счет выделения тепла в месте касания кусков (ввиду большого переходного сопротивления) последние прогреются до высокой температуры и сварятся.

В настоящее время электросварка как дуговая, так и методом сопротивления прочно вошла в промышленность и получила очень широкое распространение. Сваривают листовую и угловую сталь, балки и рельсы, мачты и трубы, фермы и котлы, суда и т. д. Сваркой выполняют новые и ремонтируют старые детали из стали, чугуна и цветных металлов.

Ученые и изобретатели нашей страны разработали множество новых методов применения электросварки. Проф. К. К. Хренов предложил способ подводной электросварки, широко использованный при строительстве газопровода Саратов — Москва. Автоматическая сварка, предложенная академиком Е. О. Патоном, позволяет очень быстро и высококачественно сваривать металлы в массовом производстве. Академик В. П. Никитин сконструировал сварочный аппарат, позволяющий производить сварку с помощью наиболее распространенного сейчас переменного тока. Аппарат имеет особую деталь — осциллятор, назначение которого заключается в том, чтобы вырабатывать переменный ток высокого напряжения и очень высокой частоты, что обеспечивает устойчивое горение дуги при сварке тонких и толстых металлических деталей.

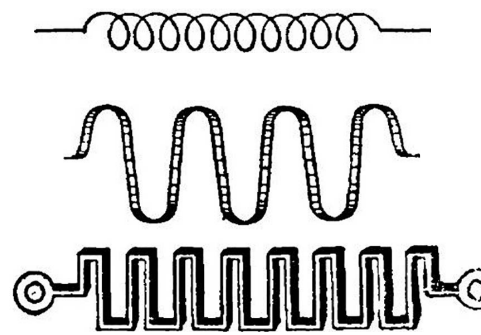
При замыкании и размыкании рубильником или выключателем электрических цепей, а также замыкании и размыкании контактов приборов и аппаратов электрическая искра, возникающая между контактами, и нередко следующая за ней электрическая дуга плавят металл, и контакты обгорают или свариваются, нарушая работу установки. Это явление называется электрической эрозией (от латинского слова «эрого» — выгрызаю). Искра при своем появлении как бы «грызет» металл. Для борьбы с искрой иногда между контактами параллельно искровому промежутку включают конденсатор определенной емкости.

Инженеры Б. Р. Лазаренко и И. Н. Лазаренко использовали свойство электрической искры «грызть металл» в сконструированной ими электроэрозионной установке. Работа установки в основном состоит в следующем. К металлическому стержню подводится один провод от источника напряжения. Другой провод

присоединяется к обрабатываемой детали, находящейся в масле. Металлический стержень заставляют вибрировать. Электрическая искра, возникающая между стержнем и деталью, «грызет» деталь, проделывая в ней отверстие, одинаковое с формой сечения стержня (шестигранное, квадратное, треугольное и т. д.).

§ 52. Электрические нагревательные приборы

Электрические нагревательные приборы получили очень большое распространение в домашнем быту (электроплитки, чайники, кастрюли, утюги, кипятильники и т. д.) и в технике (тигельные и муфельные печи, сушильные шкафы и пр.).



Фиг. 73. Образцы нагревательных элементов

Основной частью каждого электронагревательного прибора является проводник, в котором выделяется тепло, когда по нему проходит электрический ток. Чаще всего проводник свивают спиралью, которую укладывают на жаростойкое или огнеупорное основание, например из керамики, асбеста, слюды и т. п. Материалом для спиралей, нагревающихся на воздухе (фиг. 73), обычно служит нихром. Проволока для нагревателей, опускаемых в воду, чаще изготовляется из реотана или никелина. Если пропускать по таким нагревателям ток, вынув их из воды, то они перегорают, так как воздух, обладая меньшей теплопроводностью, чем вода, не может быстро уводить выделяющееся тепло.

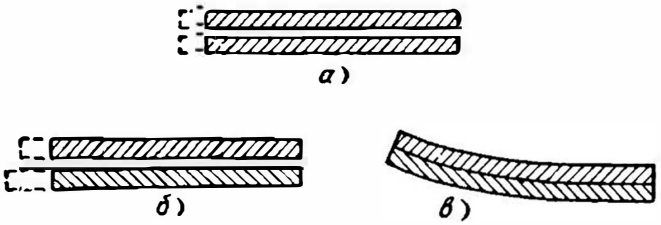
§ 53. Тепловые реле

Основной частью теплового реле является биметаллическая пластина. Слово «биметаллическая» означает, что пластина состоит из двух металлов.

Если взять две пластины из одного и того же металла и нагреть их, то они будут удлиняться одинаково (фиг. 74, *а*). Если же взять пластины из разных металлов и нагреть их, то вследствие различного теплового расширения они будут удлиняться по-разному (фиг. 74, *б*). Две пластины из разных металлов, склепанные или сваренные, образуют одну биметаллическую пластину. Обычно биметаллическая пластина выполняется из инвара (сплав железа с никелем) и латуни. При нагреве пластина изгибается в сторону металла с меньшим тепловым расширением (фиг. 74, *в*).

На фиг. 75 схематически показано устройство теплового реле. Разберем подробнее его работу.

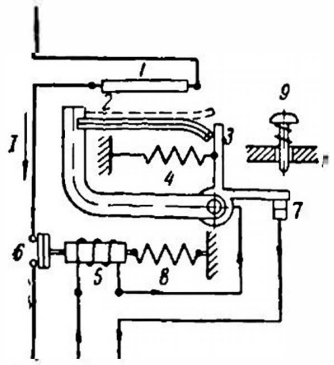
Включение электрического двигателя производится кнопкой «пуск». При нажатии кнопки «пуск» магнитная катушка *5* включает (соединяет) линейные контакты *6* в главной цепи двигателя и последний начинает работать.



Фиг. 74. Тепловое расширение металлических пластин при нагревании

Нагревательная спираль *1* теплового реле нагревается током двигателя. Биметаллическая пластина *2*, расположенная рядом со спиралью, также нагревается, но тепловое реле подбирается таким образом, что при нормальном режиме количество тепла, выделяемое нагревательной спиралью, не в состоянии изогнуть биметаллическую пластину.

Как только наступает перегрузка двигателя, он начинает забирать из сети ток больше нормального, обмотка двигателя перегревается и может сгореть. Тогда и начинает работать тепловое реле. При длительных и опасных перегрузках двигателя количество тепла, выделяемое спиралью *1*, увеличивается. Биметаллическая пластина *2*, усиленно нагреваясь, будет изгибаться и, прогнувшись вверх, освободит рычажок *3*, который ранее был защелкнут пластиной. Постоянно оттягиваемый пружиной *4* рычажок, повернувшись, разомкнет контакты *7* и тем самым разорвет цепь магнитной катушки *5*, которая под действием пружины *8* разъединит главные линейные контакты *6* в цепи двигателя. Двигатель остановится. Таким образом, тепловое реле защищает двигатель от перегрузки.



Фиг. 75. Схема устройства теплового реле

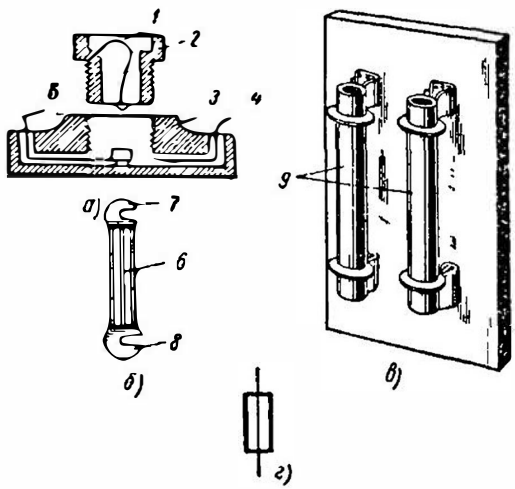
Чтобы вновь включить двигатель, нужно сначала замкнуть контакты *7*, поворачивая вручную

рычажок *3* при помощи особой кнопки «возврат» *9*. Однако рычажок *3* станет на место только после того, как биметаллическая пластина *2* остынет, вернется в свое первоначальное положение (через 0,5—3 мин. после выключения) и защелкнет рычажок. Только после этого замыкание кнопки «пуск» вызовет включение двигателя. Остановка двигателя по желанию осуществляется выключением кнопки «стоп».

§ 54. Плавкие предохранители

Плавкий предохранитель представляет собой легкоплавкую проволоку или пластину из меди, свинца или серебра, включаемую в цепь тока. По своей конструкции предохранители делятся на:

1) пробочные (фиг. 76, *а*), 2) пластинчатые (фиг. 76, *б*) и 3) трубчатые (фиг. 76, *в*).



Фиг. 76. Плавкие предохранители

В пробочных предохранителях плавкая проволока *1* помещается внутри фарфоровой пробки *2*, ввертываемой или укрепляемой в основании *3*, к которому подведены провода *4* и *5* размыкаемой цепи. В пластинчатых предохранителях плавкая вставка *6* имеет на концах наконечники *7* и *8*, зажимаемые под винты, укрепленные на изолирующем основании, к которым подведены провода размыкаемой цепи. В трубчатых предохранителях плавкая часть помещена внутри легкосъемных фарфоровых трубок *9*.

Плавкие предохранители выбирают и ставят с таким расчетом, что, как только ток в цепи по тем или иным причинам превысит допустимый предел, проволока или пластина предохранителя перегорит и разорвет цепь тока. Правильно рассчитанный

предохранитель в электрической сети всегда должен сгорать раньше, чем опасно нагреются провода самой сети. Условное обозначение плавких предохранителей, применяемых на электрических схемах, показано на фиг. 76, *г*.

В табл. 12 приведены сведения по выбору номинального тока плавкого предохранителя для проводов с резиновой изоляцией, проложенных в одной трубе, а также двух- и трехжильных кабелей с резиновой изоляцией и трубчатых проводов ТПРФ.

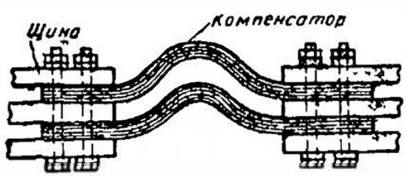
Таблица 12

Номинальный ток плавких предохранителей

Сечение провода в *мм*²	Номинальный ток плавких предохранителей в *а*	Сечение провода в *мм*²	Номинальный ток плавких предохранителей в *а*
1	10	50	160
1,5	10	70	200
2,5	20	95	225
4	25	120	260
6	35	150	300
10	60	—	—
16	80	—	—
25	100	—	—
35	125	—	—

§ 55. Соединение проводников

При плохом соединении проводников вследствие большого переходного сопротивления место соединения усиленно нагревается и может выгореть. Для избежания этого при соединении проводов концы их тщательно очищают, лудят, скручивают, а место соединнения пропаивают. При сращивании концов медных, алюминиевых или железных шин их очищают от ржавчины и окислов напильником и шлифуют шкуркой, после чего накладывают один на другой и надежно затягивают болтами.



Фиг. 77. Компенсатор

Для предотвращения окисления место соединения тщательно смазывают чистым техническим вазелином.

На длинных прямолинейных участках (больше 15 *м* для алюминиевых и больше 25 *м* для медных шин) ставят компенсаторы. Компенсаторы выполняют из того же материала, что и шины, но отдельными полосками толщиной по 0,4—1 *мм* (фиг. 77). Компенсаторы не позволяют шинам выгибаться при тепловом удлинении.

§ 56. Термоэлектричество. Термопары

Рассмотрим, что называется термоэлектричеством. Если взять два разнородных металла, спаять их концы, а два других конца присоединить к гальванометру, то при нагреве места спая металлов гальванометр покажет наличие тока в цепи. Совокупность пары металлов, используемая в этом случае, называется термопарой или термоэлементом. Появившийся в цепи ток называется термоэлектрическим, а э. д. с., порождающая этот ток, называется термоэлектродвижущей силой.

Термоэлектродвижущая сила по величине довольно мала и приблизительно пропорциональна разности температур спая и окружающей среды. Приводим таблицу термо- э. д. с. в вольтах некоторых пар металлов при разности температур спая и окружающей среды 100° (табл. 13).

Таблица 13

Термоэлектродвижущая сила термопар

Металлы спая	Величина э. д. с. в *в*
Сурьма — висмут	—0,011
Медь — железо	+0,001
Медь — константан	—0,0047
Серебро — константан	—0,0041
Серебро — никель	—0,0024
Платина — платиниородий (сплав 90% платины и 10% родия)	—0,001

Знак + обозначает, что ток идет через нагретый спай от первого металла ко второму. Важнейшим применением термоэлементов является использование их для измерения температуры. Термометр, действие которого основано на применении термопар, устроен следующим образом. В фарфоровой трубке помещают две проволочки (например, из платины и платинородия). Место спая проволок помещают в зону высокой температуры. Свободные концы проволок присоединяют к зажимам гальванометра, шкала которого имеет деления в градусах Цельсия. Термопары дают возможность измерять высокие (до 2000° и выше) и низкие температуры. Точность термопар выше точности термометров другого типа.

Задачи для самостоятельного решения

1. Сколько тепла выделит в течение 1 часа ток 5 *а*, проходя по нагревательной спирали электрического утюга, если спираль имеет сопротивление 24 *ом*?

2. Электродвижущая сила аккумулятора 2 *в*, внутреннее сопротивление 0,5 *ом*. Зажимы аккумулятора замкнуты проводником сопротивлением 3,5 *ом*. Определить, сколько тепла выделит ток в проводнике в течение 0,5 часа.

3. Две электрические лампы сопротивлением 250 и 100 *ом* включены в сеть напряжением 100 *в*. Определить сколько тепла в течение 3 мин. выделит ток в каждой лампе, если они соединены: а) последовательно, б) параллельно.

4. Спираль электрической плитки изготовлена из нихромовой проволоки сечением 0,5 *мм*^{2}, длиной 10 *м*. Определить, сколько тепла выделит ток в течение 10 мин., если плитка включена в сеть напряжением 110 *в*.

5. Три проводника сопротивлением 2, 3 и 6 *ом* включены между собой параллельно. Общий ток равен 18 *а*. Определить, сколько тепла ежесекундно выделит ток в каждом проводнике.

6. Электродвижущая сила источника тока 20 *в*, внутреннее сопротивление его 0,2 *ом*. Во внешнюю сеть включен электрический нагреватель, изготовленный из никелиновой проволоки сечением 0,2 *мм*^{2}, длиной 10 *м*. Сколько тепла выделит ток в нагревателе за 1 час?

7. Необходимо рассчитать электрическую плиту, которая могла бы вскипятить 2,5 *л* воды, взятой при температуре 10° в течение 40 мин. Потери тепла на нагрев самой плитки, чайника и воздуха равны 40%. Для намотки спирали плитки использован нихром сечением 0,5 *мм*^{2}. Какую длину нихромовой проволоки необходимо взять, если плитка будет включена в сеть напряжением 120 *в*?

Контрольные вопросы

1. Как читается закон Джоуля — Ленца и какова его формула?
2. Что за число 0,24 в формуле закона Джоуля — Ленца?
3. Каково практическое применение тепловых действий электрического тока?
4. Каково назначение плавких предохранителей и как они устроены?
5. Как устроены тепловые реле и где они применяются?
6. Как происходит сварка электрическим током?
7. Что называется плотностью тока и почему для больших сечений проводников плотность тока уменьшается?
8. От каких причин зависит нагрев проводника?
9. Что такое термоэлектричество и где оно используется в технике?

ГЛАВА ПЯТАЯ

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

§ 57. Магнитное поле вокруг прямолинейного проводника с током

В первой главе мы изучали одну из сторон электромагнитного поля — поле электрическое. Теперь мы приступаем к рассмотрению другой стороны электромагнитного поля, называемой магнитным полем.

Если к прямолинейному проводнику с электрическим током поднести магнитную стрелку, то она будет стремиться стать перпендикулярно плоскости, проходящей через ось проводника и центр вращения стрелки. Это указывает на то, что на стрелку действуют особые силы, которые называются магнитными силами. Кроме действия на магнитную стрелку, магнитное поле оказывает влияние на движущиеся заряженные частицы и на проводники с током, находящиеся в магнитном поле. В проводниках, движущихся в магнитном поле, или в неподвижных проводниках, находящихся в переменном магнитном поле, возникает индуктивная э. д. с.

В соответствии с вышесказанным мы можем дать следующее определение магнитного поля.

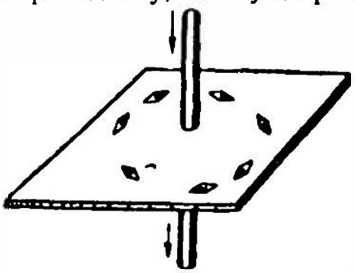
Магнитным полем называется одна из двух сторон электромагнитного поля, возбуждаемая электрическими зарядами движущихся частиц и изменением электрического поля и характеризующаяся силовым воздействием на движущиеся заряженные частицы, а стало быть, и на электрические токи.

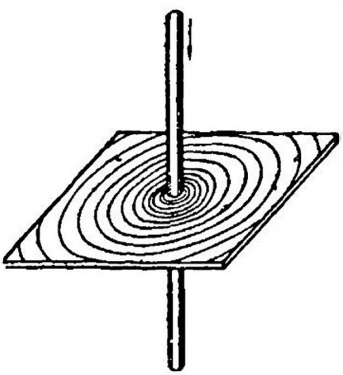
Если продеть через картон толстый проводник и пропустить по нему электрический ток, то стальные опилки, насыпанные на картон, расположатся вокруг проводника по концентрическим окружностям, представляющим собой в данном случае так называемые магнитные индукционные линии (фиг. 78). Мы можем передвигать картон вверх или вниз по проводнику, но расположение стальных опилок не изменится. Следовательно, магнитное поле возникает вокруг проводника по всей его длине.

Если на картон поставить маленькие магнитные стрелки, то, меняя направление тока в проводнике, можно увидеть, что маг-

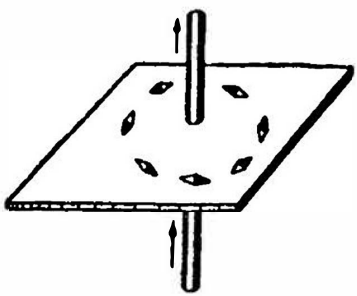
нитные стрелки будут поворачиваться (фиг. 79). Это показывает, что направление магнитных индукционных линий меняется с изменением направления тока в проводнике.

Магнитные индукционные линии вокруг проводника с током обладают следующими свойствами: 1) магнитные индукционные линии прямолинейного проводника имеют форму концентрических окружностей; 2) чем ближе к проводнику, тем гуще располагаются магнитные индукционные линии; 3) магнитная индукция (интенсивность поля) зависит от величины тока в проводнике; 4) направление магнитных индукционных линий зависит от направления тока в проводнике.

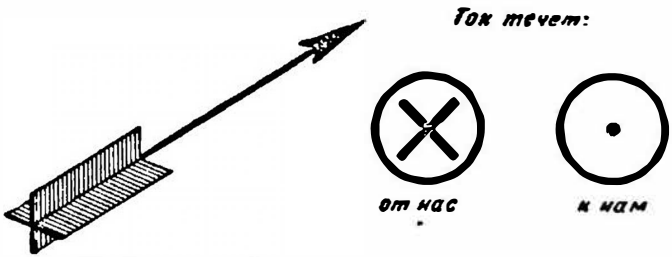




Фиг. 78. Магнитное поле вокруг проводника с током



Фиг. 79. Направление магнитных индукционных линий

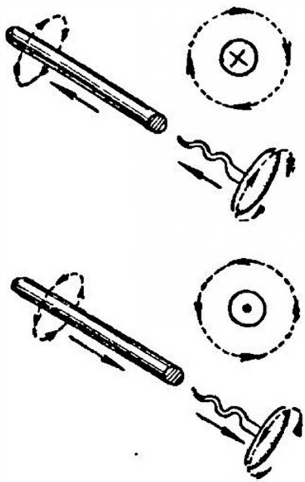


Фиг. 80. Условное обозначение направления тока в проводниках

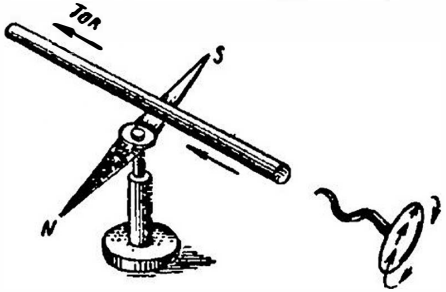
Чтобы показать направление тока в проводнике, изображенном в разрезе, принято условное обозначение, которым мы в дальнейшем будем пользоваться. Если мысленно поместить в проводнике стрелу по направлению тока (фиг. 80), то в проводнике, ток в котором направлен от нас, увидим хвост опере-

ния стрелы (крестик); если же ток направлен к нам, увидим острие стрелы (точку).

Направление магнитных индукционных линий вокруг проводника с током можно определить по «правилу буравчика». Если буравчик (штопор) с правой резьбой будет двигаться поступательно по направлению тока, то направление вращения ручки будет совпадать с направлением магнитных индукционных линий вокруг проводника (фиг. 81).



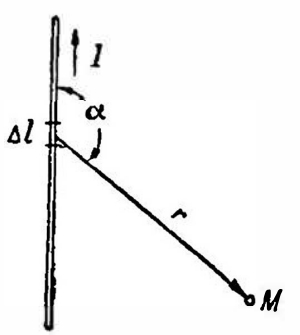
Фиг. 81. Определение направления магнитных индукционных линий вокруг проводника с током по «правилу буравчика»



Фиг. 82. Определение направления отклонения магнитной стрелки, поднесенной к проводнику с током, по «правилу буравчика»

Магнитная стрелка, внесенная в поле проводника с током, располагается вдоль магнитных индукционных линий. Поэтому для определения ее расположения можно также воспользоваться «правилом буравчика» (фиг. 82). Магнитное поле есть одно из важнейших проявлений электрического тока и не может быть получено независимо и отдельно от тока. *Магнитное поле характеризуется вектором магнитной индукции, который имеет, следовательно, определенную величину и определенное направление в пространстве.*

Количественное выражение для магнитной индукции в результате обобщения опытных данных было установлено Био и Саваром (фиг. 83). Измеряя по отклонению магнитной стрелки магнитные поля электрических токов различной величины и формы, оба ученых пришли к выводу, что всякий элемент тока создает на некотором рас-



Фиг. 83. К закону Био и Савара

стоянии от себя магнитное поле, *магнитная индукция которого ΔB прямо пропорциональна длине Δl этого элемента, величине протекающего тока I, синусу угла α между направлением тока и радиусом-вектором, соединяющим интересующую нас точку поля с данным элементом тока, и обратно пропорциональна квадрату длины этого радиуса-вектора r:*

$$\Delta B = K \frac{I \Delta l \sin \alpha}{r^2},$$

где K — коэффициент, зависящий от магнитных свойств среды и от выбранной системы единиц.

В абсолютной практической рационализованной системе единиц МКСА

$$K = \frac{\mu \mu_0}{4\pi},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость пустоты в системе МКСА:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{\text{генри}}{\text{метр}};$$

генри (*гн*) — единица индуктивности; 1 *гн* = 1 *ом · сек.*

μ — относительная магнитная проницаемость — безразмерный коэффициент, показывающий, во сколько раз магнитная проницаемость данного материала больше магнитной проницаемости пустоты.

Размерность магнитной индукции можно найти по формуле

$$[\Delta B] = \left[\frac{\mu \mu_0 I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}\right] = \frac{ом \cdot сек}{м} \cdot \frac{а \cdot м}{м^2} = \frac{в \cdot сек}{м^2},$$

вольт-секунда иначе называется вебером (*вб*):

$$[B] = \frac{вб}{м^2}.$$

На практике встречается более мелкая единица магнитной индукции — гаусс (*гс*):

$$1 \frac{вб}{м^2} = 10^4 \; гс.$$

Закон Био и Савара позволяет вычислить магнитную индукцию бесконечно длинного прямолинейного проводника:

$$B = \mu \mu_0 \frac{I}{2\pi a},$$

где a — расстояние от проводника до точки, где определяется магнитная индукция.

Отношение магнитной индукции к произведению магнитных

проницаемостей $\mu \cdot \mu_0$ называется напряженностью магнитного поля и обозначается буквой H:

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0}$$

или

$$B = H\mu\mu_0.$$

Последнее уравнение связывает две магнитные величины: индукцию и напряженность магнитного поля.

Найдем размерность H:

$$[H] = \left[\frac{B}{\mu\mu_0}\right] = \frac{в \cdot сек \cdot м}{м^2 \cdot ом \cdot сек} = \frac{а}{м}.$$

Иногда пользуются другой единицей напряженности — эрстедом (*эр*):

$$1\ эр = 79{,}6\ а/м \approx 80\ а/м \approx 0{,}8\ а/см.$$

Напряженность магнитного поля H, как и магнитная индукция B, является векторной величиной.

Линия, касательная к каждой точке которой совпадает с направлением вектора магнитной индукции, называется линией магнитной индукции или магнитной индукционной линией.

Произведение магнитной индукции на величину площадки, перпендикулярной направлению поля (вектору магнитной индукции), называется потоком вектора магнитной индукции или просто магнитным потоком и обозначается буквой Ф:

$$\Phi = BS.$$

Размерность магнитного потока:

$$[\Phi] = [BS] = \frac{в \cdot сек}{м^2} \cdot м^2 = в \cdot сек \text{ или вебер } (вб),$$

т. е. магнитный поток измеряется в вольт-секундах или веберах.

Более мелкой единицей магнитного потока является максвелл (*мкс*):

$$1\ вб = 10^8\ мкс.$$

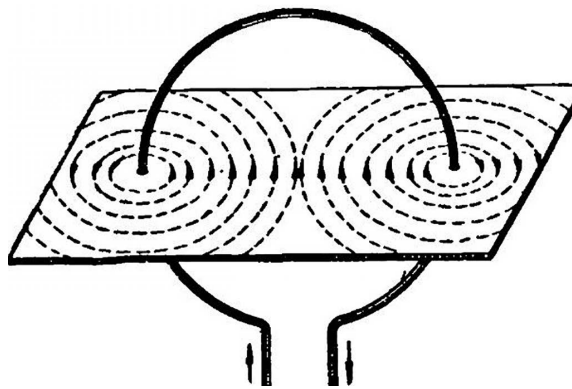
$$1\ мкс = 1\ гс \cdot 1\ см^2.$$

§ 58. Круговой проводник с током

Возьмем проводник, согнутый по кругу, и пропустим по нему ток (фиг. 84). Из чертежа видно, что магнитные линии по-прежнему замыкаются вокруг проводника с током и имеют форму окружностей. Магнитные линии с одной стороны входят в плоскость кругового проводника, с другой выходят. Магнитное по-

ле кругового тока напоминает собой поле очень короткого магнита, ось которого совпадает с перпендикуляром к середине плоскости контура.

Направление поля кругового тока можно определить, пользуясь «правилом буравчика».



Фиг. 84. Круговой проводник с током

Буравчик нужно расположить по оси кругового тока перпендикулярно его плоскости. Если теперь вращать ручку буравчика по направлению тока в контуре, то поступательное движение буравчика покажет направление магнитного поля. Напряженность магнитного поля в центре кругового проводника с током определяется по формуле:

$$H = \frac{I}{2R};$$

переходя к магнитной индукции, имеем:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R} \text{ или } B = \frac{\mu\mu_0 I}{D},$$

где R — радиус витка;

D — диаметр витка.

§ 59. Соленоид. Электромагнит

Соленоидом называется проводник, свитый спиралью, по которому пропущен электрический ток (фиг. 85, *а*).

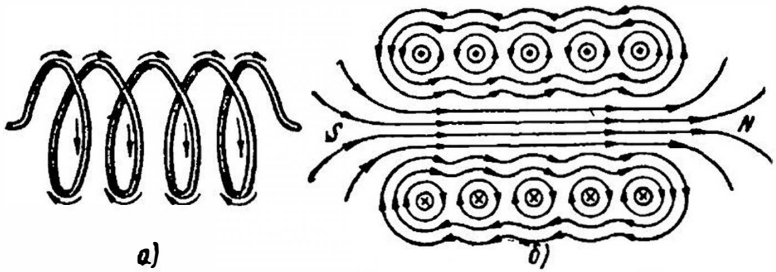
Если мысленно разрезать витки соленоида поперек, обозначить направление тока в них, как было указано выше, и определить направление магнитных индукционных линий по «правилу буравчика», то магнитное поле всего соленоида будет иметь такой вид, как показано на фиг. 85, *б*.

На оси бесконечно длинного соленоида, на каждой единице

длины которого намотано n_0 витков, напряженность поля определяется формулой:

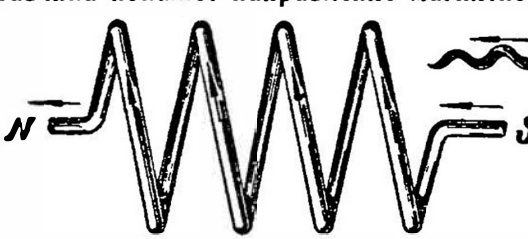
$$H = In_0.$$

В том месте, где магнитные линии входят в соленоид, образуется южный полюс, где они выходят — северный полюс.

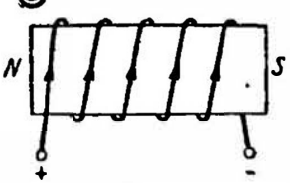


Фиг. 85. Соленоид (*а*) и его магнитное поле (*б*)

Для определения полюсов соленоида пользуются «правилом буравчика», применяя его следующим образом: если расположить буравчик вдоль оси соленоида и вращать его по направлению тока в витках соленоида, то поступательное движение буравчика покажет направление магнитного поля (фиг. 86).



Фиг. 86. Определение полюсов соленоида



Фиг. 87. Электромагнит

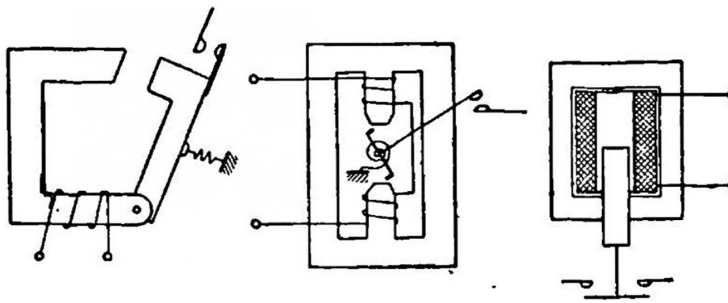
Соленоид, внутри которого находится стальной (железный) сердечник, называется электромагнитом (фиг. 87). Магнитное поле у электромагнита сильнее, чем у соленоида, так как кусок стали, вложенный в соленоид, намагничивается и результирующее магнитное поле усиливается. Полюсы у электромагнита можно определить, так же как и у соленоида, по «правилу буравчика».

Электромагниты широко применяются в технике. Они служат для создания магнитного поля в электрических генераторах и двигателях, в электроизмерительных приборах, электрических аппаратах и т. п.

В установках большой мощности для отключения поврежденного участка цепи вместо плавких предохранителей применяются автоматические, масляные и воздушные выключатели. Для приведения в действие отключающих катушек автоматических вы-

ключателей применяются различные реле. Реле называются приборы или автоматы, реагирующие на изменение тока, напряжения, мощности, частоты и пр.

Из большого числа реле, различных по своему назначению, принципу действия и конструкции, кратко рассмотрим устройство электромагнитных реле На фиг. 88 представлены конструкции этих реле. Работа реле основана на взаимодействии магнитного поля, создаваемого неподвижной катушкой, по которой



Фиг. 88. Электромагнитное реле

проходит ток, и стального подвижного якоря. При изменении условий работы в цепи главного тока катушка реле возбуждается, магнитный поток сердечника подтягивает (поворачивает или втягивает) якорь, который замыкает контакты в цепи, отключающей катушки привода масляных и воздушных выключателей или вспомогательных реле.

Реле нашли себе применение также в автоматике и телемеханике.

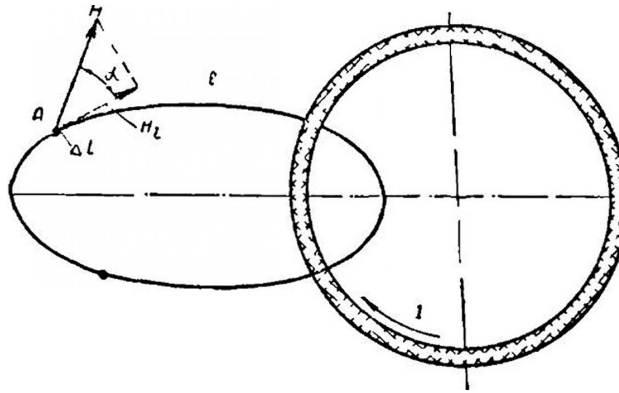
Магнитный поток соленоида (электромагнита) увеличивается с увеличением числа витков и тока в нем. Намагничивающая сила зависит от произведения тока на число витков (числа ампер-витков).

Если, например, взять соленоид, по обмотке которого проходит ток 5 *а* и число витков которого равно 150, то число ампер-витков будет $5 \cdot 150 = 750$. Тот же магнитный поток получится, если взять 1500 витков и пропустить по ним ток 0,5 *а*, так как $0{,}5 \cdot 1500 = 750$ ампер-витков.

Увеличить магнитный поток соленоида можно следующими путями: 1) вложить в соленоид стальной сердечник, превратив его в электромагнит; 2) увеличить сечение стального сердечника электромагнита (так как при данных токе, напряженности магнитного поля, и стало быть, магнитной индукции увеличение сечения ведет к росту магнитного потока); 3) уменьшить воздушный зазор электромагнита (так как при уменьшении пути магнитных линий по воздуху уменьшается магнитное сопротивление).

§ 60. Закон полного тока

Пусть произвольная замкнутая линия l пронизывает проводник с током (фиг. 89), т. е. они сцепляются друг с другом как два звена цепи. Вокруг проводника возникает магнитное поле.



Фиг. 89. Закон полного тока

Построим вектор напряженности H, создаваемой током в точке A, расположенной на линии l. Если линия охватывает несколько проводников с током, то для каждого тока строятся векторы напряженности в данной точке линии. Складывая геометрически отдельные векторы напряженности, находим вектор результирующей напряженности магнитного поля.

Вектор результирующей напряженности H в общем случае образует с элементом длины Δl угол α. Поэтому продольная или тангенциальная составляющая H_l результирующей напряженности H будет:

$$H_l = H\cos\alpha.$$

Если разбить замкнутую линию на n элементов длины и сложить произведения длин всех элементов на тангенциальные составляющие результирующей напряженности в этих элементах, получим следующую сумму:

$$H_1\Delta l_1\cos\alpha_1 + H_2\Delta l_2\cos\alpha_2 + \cdots + H_n\Delta l_n\cos\alpha_n.$$

Эту сумму можно представить так:

$$\sum_{k=1}^{k=n} H_k\Delta l_k\cos\alpha_k,$$

где знак $\sum_{k=1}$ означает сумму от $k=1$ до $k=n$.

В теоретической электротехнике доказывается, что указанная сумма равна алгебраической сумме токов, сцепляющихся с контуром суммирования подобно тому, как сцепляются между собой два смежных звена цепи.

Следовательно, можно написать:

$$\sum H_k \Delta l_k \cos \alpha_k = \sum I.$$

Это выражение называется законом полного тока. Для случая, когда контур многократно пронизывает один и тот же ток, как, например, при наличии обмотки с числом витков w, полный ток будет:

$$\sum I = wI.$$

Если замкнутый контур суммирования совпадает с магнитной линией, то вектор напряженности в любой точке контура будет направлен по касательной к элементу длины Δl.

В этом случае

$$H_{tk} = H_k;\ \alpha_k = 0;\ \cos \alpha_k = 1,$$

и закон полного тока принимает вид:

$$\sum_{k=1}^{k=n} H_k \Delta l_k = \sum I.$$

Если значение напряженности для всех точек контура при этом одинаково, а сумма Δl по контуру равна l, то закон полного тока запишется так:

$$Hl = \sum I.$$

Закон полного тока является основным законом при расчете магнитных цепей и дает возможность в некоторых случаях легко определять напряженность поля.

Например, применяя закон полного тока для определения напряженности на расстоянии a от прямолинейного проводника с током, имеем:

$$\sum I = I,$$

$$l = 2\pi a.$$

Поэтому

$$H 2\pi a = I,$$

откуда

$$H = \frac{I}{2\pi a} \frac{a}{\mu}.$$

Эта же формула была нами получена из закона Био и Савара.

Чтобы определить напряженность поля внутри катушки, на-

мотанной на кольцо (фиг. 90), воспользуемся опять законом полного тока. Контуром здесь является окружность радиуса r. Контур пронизывает w проводников с токами одного направления:

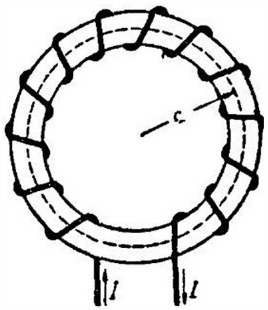
$$H \cdot 2\pi r = Iw.$$

Обозначая длину средней линии кольца через $l = 2\pi r$, получаем:

$$Hl = Iw,$$

откуда

$$H = \frac{Iw}{l} \frac{а}{м}.$$



Фиг. 90. К определению напряженности поля катушки, намотанной на кольцо

Таким образом, напряженность поля катушки пропорциональна произведению числа ампер на число витков или числу ампер-витков. $I \cdot w$ называется намагничивающей силой (НС) и обозначается буквой F. Так как w — число отвлеченное, то намагничивающая сила измеряется в амперах.

Магнитная индукция внутри катушки будет:

$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{Iw}{l} \frac{вб}{м^2}.$$

Если площадь поперечного сечения кольца по всей длине одинакова и равна S, то, зная магнитную индукцию B, можно определить магнитный поток Ф:

$$\Phi = BS = \mu\mu_0 HS = \mu\mu_0 \frac{IwS}{l} вб.$$

Эту формулу можно представить в ином виде:

$$\Phi = \frac{Iw}{\frac{l}{\mu\mu_0 S}}.$$

По своему строению эта формула напоминает формулу Ома. Выше было указано, что произведение $I \cdot w$ называется намагничивающей силой. Выражение $\left(\frac{l}{\mu\mu_0 S}\right)$, стоящее в знаменателе, называется магнитным сопротивлением и обозначается буквой $R_м$:

$$R_м = \frac{l}{\mu\mu_0 S}.$$

Из этой формулы видно, что магнитное сопротивление пропорционально длине пути и обратно пропорционально сечению материала, по которому проходит магнитный поток.

Таким образом, магнитный поток Ф пропорционален намагничивающей силе F и обратно пропорционален магнитному сопротивлению $R_м$:

$$\Phi = \frac{F}{R_м}.$$

§ 61. Ферромагнитные, парамагнитные и диамагнитные тела

По характеру магнитных свойств все вещества можно разделить на три группы:

1. Ферромагнитные — вещества, сильно притягивающиеся к магниту. К ним принадлежат железо, сталь, чугун, никель, кобальт, редкоземельный элемент гадолиний и некоторые сплавы. У этих веществ относительная магнитная проницаемость имеет величину от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч. Например, для кобальта — 150, никеля — 300, железа — до 500, пермаллоя (сплав стали с никелем) — до 100 000.

2. Парамагнитные — вещества, слабо притягивающиеся к магниту. К ним принадлежат алюминий, магний, олово, платина, марганец, кислород и др. У этих веществ относительная магнитная проницаемость немного больше единицы. Например, у воздуха $\mu = 1{,}0000031$.

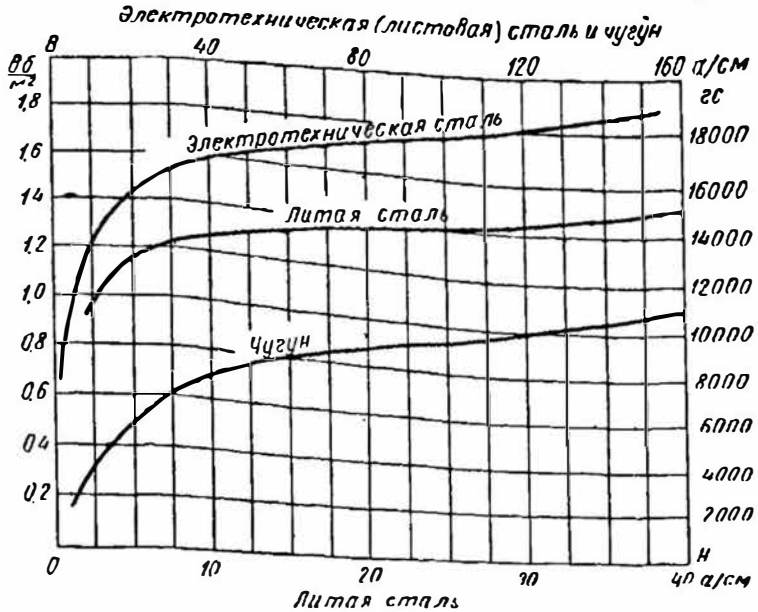
3. Диамагнитные — вещества, слабо отталкивающиеся от магнита. К ним принадлежат цинк, ртуть, свинец, сера, медь, хлор, серебро, вода и др. У этих веществ относительная магнитная проницаемость немного меньше единицы. Например, у меди $\mu = 0{,}999995$.

§ 62. Ферромагнитные тела в магнитном поле

Зависимость между B и H у ферромагнитных материалов обычно выражается графически в виде так называемой кривой намагничивания. Для построения кривой от горизонтальной оси откладывают напряженность магнитного поля H в $\frac{а}{м}$, $\frac{а}{см}$ или эрстедах, а по вертикальной оси откладывают величину магнитной индукции B в $\frac{вб}{м^2}$, $\frac{вб}{см^2}$ или гауссах. На фиг. 91 приведены кривые намагничивания электротехнической стали, литой стали и чугуна. Величины напряженности магнитного поля для литой стали даны на нижней горизонтали, для электротехнической стали и чугуна — на верхней горизонтали. Из рассмотрения кривой намагничивания видно, что с увеличением напряженности H магнитная индукция B сначала быстро возрастает, затем в месте изгиба кривой скорость роста B уменьшается и, наконец, за изгибом кривая незначительно поднимается вверх, переходя в прямую линию. Последний участок кривой характеризует со-

стояние магнитного насыщения материала. Из кривой намагничивания видно, что отношение $\frac{B}{\mu_0 H} = \mu$ не является постоянной величиной, а все время меняется с изменением B и H.

Магнитная проницаемость ферромагнитных тел зависит от величины магнитной индукции, химического состава металла, его предварительной термической и механической обработки,



Фиг. 91. Кривые намагничивания электротехнической стали, литой стали и чугуна

температуры металла. Кроме того, магнитная проницаемость этих тел зависит от их формы и геометрических размеров.

Кривые намагничивания снимаются опытным путем отдельно для каждого материала и каждого сорта этого материала.

Будем уменьшать ток в витках катушки. Напряженность поля, а вместе с ней и магнитная индукция будут уменьшаться. Когда ток в обмотке катушки будет равен нулю, напряженность поля также будет равна нулю. Однако стальной сердечник будет сохранять некоторую магнитную индукцию.

Индукция, которая остается в ферромагнитном теле при напряженности поля, равной нулю, называется остаточной индукцией или остаточным магнетизмом.

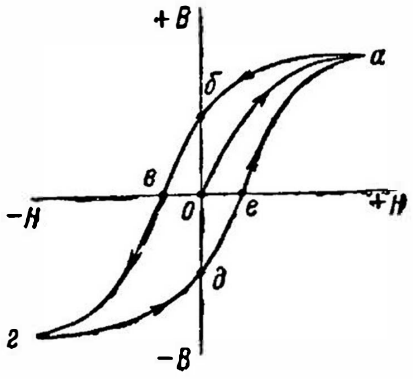
Небольшим остаточным магнетизмом обладают чистое железо, мягкая сталь, сплавы железа с кремнием (электротехническая сталь), сплавы железа с никелем (пермаллой). Эти метал-

лы и сплавы легко намагничиваются и так же легко размагничиваются. Они нашли себе применение при изготовлении сердечников электромагнитов, трансформаторов, полюсных наконечников, якорей генераторов и т. п.

Наибольшим остаточным магнетизмом обладают специальные сорта твердых сталей: вольфрамовой, хромистой, кобальтовой, никельалюминневой. Эти стали применяются для изготовления постоянных магнитов.

§ 63. Гистерезис [1]

Рассмотрим процесс переменного намагничивания ферромагнитного материала. Для этой цели намотаем на стальной сердечник обмотку и будем по ней пропускать постоянный ток. Предположим, что сердечник электромагнита ранее не был намагничен. Увеличивая проходящий по виткам обмотки ток I от нуля, мы тем самым будем увеличивать намагничивающую силу и напряженность поля H. Величина магнитной индукции B в сердечнике будет также увеличиваться. Кривая намагничивания Oa на фиг. 92 имеет прямолинейную часть, а затем вследствие насыщения кривая поднимается медленно, приближаясь к горизонтали. Если теперь, достигнув точки a, уменьшать H, то будет уменьшаться и B. Однако уменьшение B при уменьшении H, т. е. при размагничивании, будет происходить с запаздыванием по отношению к уменьшению H. Величина остаточной индукции при $H=0$ характеризуется отрезком $Об$.



Фиг. 92. Петля гистерезиса

Для того чтобы магнитная индукция в сердечнике стала равной нулю, необходимо намагничивать материал в обратном направлении, т. е. перемагничивать его. Для этой цели направление тока в обмотке меняется на обратное. Направление магнитных линий и напряженности поля также изменяется. При напряженности поля $H=Ов$ индукция в сердечнике равна нулю и материал сердечника полностью размагничен. Значение напряженности поля $H=Ов$ при $B=0$ является определенной характеристикой материала и называется задерживающей (коэрцитивной) силой.

[1] Слово «гистерезис» означает отставание, запаздывание.

Повторяя процесс перемагничивания, мы получаем замкнутую кривую *а б в г д е а*, называемую петлей гистерезиса. На этом опыте легко убедиться, что намагничивание и размагничивание сердечника (появление и исчезновение полюсов, магнитной индукции или магнитного потока) отстают от момента появления и исчезновения намагничивающей и размагничивающей силы (тока в обмотке электромагнита). Явление гистерезиса можно иными словами охарактеризовать как отставание изменений магнитной индукции от изменений напряженности поля. Перемагничивание материала связано с затратой некоторого количества энергии, которая выделяется в виде тепла, нагревающего материал.

Гистерезис особенно сильно сказывается, если материал сердечника обладает большим остаточным магнетизмом (например, твердая сталь). Явление гистерезиса в большинстве случаев вредно. Оно сопровождается нагревом сердечника, лишней затратой мощности источника напряжения и гудением сердечника вследствие перемены полярности и поворотов элементарных частиц материала сердечника.

Первое серьезное исследование процессов намагничивания стали было проведено Александром Григорьевичем Столетовым (1839—1896) в 1872 г. и опубликовано в работе «О функции намагничивания мягкого железа».

А. Г. Столетов, кроме того, исследовал и объяснил природу внешнего фотоэффекта и изготовил первый фотоэлемент.

§ 64. Магнитные цепи и их расчет

Магнитной цепью или магнитопроводом называется путь, по которому замыкается магнитный поток. Этот путь может проходить целиком по воздуху.

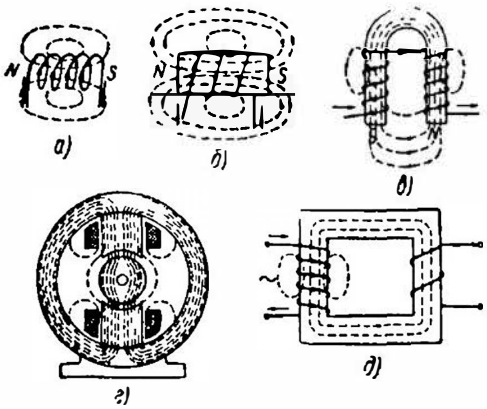
На фиг. 93, *а* показан соленоид. Магнитная цепь здесь проходит через воздух. Магнитное сопротивление воздуха очень велико, поэтому даже при большой намагничивающей силе магнитный поток мал.

Для увеличения магнитного потока в состав магнитной цепи вводят ферромагнитные материалы (обычно литая или электротехническая сталь), имеющие меньшее магнитное сопротивление.

На рис. 93, *б* представлен прямой электромагнит с разомкнутым сердечником. Магнитные линии только небольшую часть своего пути проходят по стальному сердечнику, бо́льшую же часть своего пути они проходят по воздуху. Полюсы электромагнита определяются при помощи «правила буравчика».

Подковообразный электромагнит, изображенный на фиг. 93, *в*, представляет магнитную цепь с лучшими условиями для прохождения магнитного потока. При такой конструкции поток бо́льшую часть пути проходит по стали и меньшую часть от полюса *N* до полюса *S* по воздуху.

На фиг. 93, *г* представлена конструкция магнитной цепи, применяемая в электромашиностроении и приборостроении. Между полюсами электромагнита помещается стальной якорь. Бо́льшую часть своего пути магнитные линии проходят по стали и только очень малую часть (от нескольких долей миллиметра до 2—3 *мм*) проходят по двум воздушным промежуткам.



Фиг. 93. Примеры магнитных цепей

Трансформаторы имеют замкнутый стальной сердечник (фиг. 93, *д*). Сердечники трансформаторов собираются из нескольких частей, но во время сборки принимают меры к тому, чтобы воздушные зазоры между отдельными частями практически были равны нулю.

До сих пор мы не говорили о том, что магнитный поток, созданный намагничивающей силой, не весь замыкается по тому пути, который ему предназначен. Помимо рабочего магнитного потока, существует магнитный поток рассеяния, который замыкается вне того места, где используется рабочий поток. На фиг. 93, *б, в, г, д* показаны потоки рассеяния.

Таким образом, общий магнитный поток, который должна создать обмотка возбуждения электромагнита, равен сумме рабочего потока и потока рассеяния.

Расчет магнитной цепи, казалось бы, можно производить по формуле:

$$\Phi = \frac{Iw}{\frac{l_{ср}}{\mu\mu_0 S}}.$$

Но если вспомнить, что относительная магнитная проницаемость μ для ферромагнитных тел непостоянна и зависит от многих причин, то становится ясно, что этой формулой можно пользоваться лишь в том случае, когда в состав магнитной цепи входят только немагнитные тела (в том числе и воздух), для которых μ есть заранее заданная величина.

На практике для расчета магнитных цепей предпочитают пользоваться графическими методами решения.

Расчет магнитной цепи производят в следующем порядке. Задаются необходимой величиной магнитного потока. Разбивают магнитную цепь на участки, имеющие одинаковые попереч-

ные сечения и однородный материал, и для каждого участка определяют величину магнитной индукции по формуле:

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

Затем по кривым намагничивания для данного материала находят для каждого значения магнитной индукции величину H. Если в магнитной цепи встречаются воздушные зазоры, то зависимость между B_0 и H_0 определяется по формуле:

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{B_0 10^7}{4\pi} = 80 \cdot 10^4 B_0 \ \frac{a}{м}.$$

Здесь B_0 выражено в $\frac{вб}{м^2}$, μ_0 — в $\frac{гн}{м}$, H_0 — в $\frac{a}{см}$.

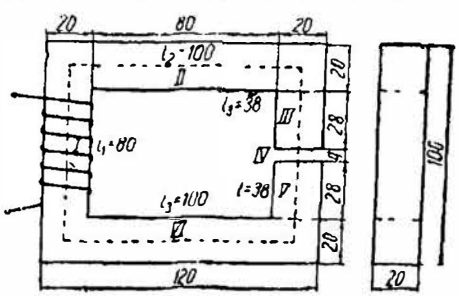
Если индукция выражена в гауссах, а напряженность в $\frac{a}{см}$, то зависимость между B_0 и H_0 будет:

$$H_0 = 0{,}8 \ B_0.$$

Определив величину H для каждого участка, находим по закону полного тока величину намагничивающей силы по формуле:

$$Iw = H_0 l_0 + H_1 l_1 + H_2 l_2 + \cdots + H_n l_n.$$

Пример. Найти намагничивающую силу обмотки электромагнита, изображенного на фиг. 94. Размеры даны в миллиметрах. Материал сердечника — электротехническая сталь. В сердечнике необходимо создать магнитный поток 60 000 *мкс*. Магнитным рассеянием пренебрегаем.



Фиг. 94. К примеру расчета магнитной цепи

Проводим средиюю линию по всей длине магнитной цепи. Разбиваем цепь на пять участков и определяем длину каждого участка.

Так как магнитный поток во всех участках одинаков и площадь поперечного сечения всех участков магнитной цепи одинакова (2×2 *см*), то магнитная индукция везде также будет одинакова.

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{60\,000 \ мкс}{4 \ см^2} = 15\,000 \ гс.$$

По кривой намагничивания (фиг. 91) для электротехнической стали по индукции 15 000 *гс* находим напряженность магнитного поля $H = 30$ *а/см*. Для воздушного зазора имеем:

$$H_0 = 0{,}8 \cdot 15\,000 = 12\,000 \frac{a}{см}.$$

Умножая величины напряженности на длины соответствующих участков, получаем произведения Hl для этих участков.

Результаты вычислений записываем в таблицу (табл. 14).

Таблица 14

№ участков	Материал	B	l	H	Hl
		гс	*см*	*а/см*	*а*
I	Электротехн. сталь	15 000	8	30	240
II и VI	То же	15 000	10×2	30	600
III и V	»	15 000	3,8×2	30	228
IV	Воздух	15 000	0,4	12 000	4800

$$I \cdot w = \Sigma (Hl) = 5868 \text{ а}.$$

Интересно отметить, что если на участках из электротехнической стали I, II, III, V и VI общей протяженностью 35,6 *см* (8+20+7,6 *см*) для проведения магнитного потока необходима намагничивающая сила 1068 *а* (240+ +600+228 *а*), то на воздушный зазор длиной всего 4 *мм* (в 89 раз меньше длины пути по стали) нужна намагничивающая сила 4800 *а*. Отсюда становится понятной необходимость создания магнитных цепей с минимальными воздушными зазорами.

§ 65. Постоянные магниты

После открытия магнитного поля вокруг проводника с током была замечена тождественность магнитного действия токов и постоянных магнитов. Позднее наука пришла к выводу, что причиной любого магнитного поля является электрический ток. На основании этого вывода наука отказалась от старого представления о существовании в природе положительных и отрицательных магнитных масс, сосредоточенных в северном и южном полюсах магнитов.

Магнитное поле намагниченного ферромагнитного тела (т. е. постоянного магнита) согласно современным научным представлениям создается в основном собственным вращением электронов вокруг осей, проходящих через них, что эквивалентно некоторым элементарным замкнутым токам.

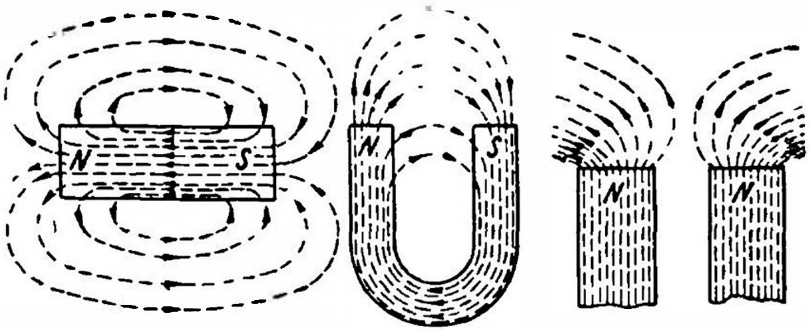
В ненамагниченном теле отдельные группы элементарных токов и их магнитные поля расположены хаотически. Поэтому во внешнем пространстве магнитного поля не наблюдается.

Под влиянием внешнего магнитного поля элементарные токи, обусловленные собственным вращением электронов, в большей или меньшей степени устанавливаются параллельно один другому и создают результирующее магнитное поле.

Ферромагнитное тело, обладающее остаточной намагниченностью, называется **постоянным магнитом**.

Если постоянный магнит накрыть картоном или стеклом и насыпать сверху железных опилок, то они будут располагаться в виде изогнутых линий, идущих от одного полюса магнита к дру-

гому (фиг. 95). Условно считают магнитные индукционные линии выходящими из северного полюса магнита и входящими в его южный полюс (фиг. 95).



Фиг. 95. Магнитное поле постоянных магнитов

Магнитные индукционные линии обладают следующими свойствами:

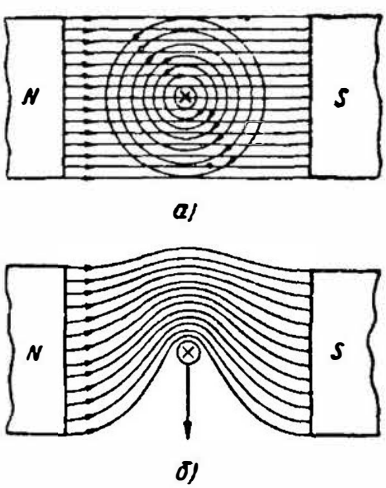
1) образуют замкнутые контуры, т. е. нигде не прерываются;

2) внутри магнита магнитные индукционные линии идут от южного полюса к северному;

3) имеют стремление укоротиться по своей длине, т. е. обладают свойством продольного тяжения;

4) стремятся воздействовать друг на друга в перпендикулярном к их длине направлении, т. е. обладают свойством бокового распора;

5) магнитные индукционные линии никогда не пересекаются.



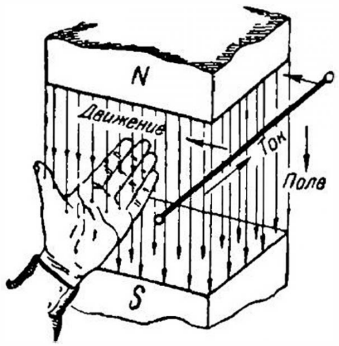
Фиг. 96. Взаимодействие проводника с током и магнитного поля

§ 66. Проводник с током в магнитном поле

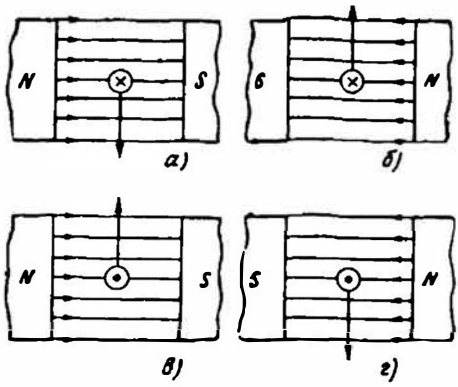
Если внести проводник с током в магнитное поле (фиг. 96, *а*), то мы увидим, что в результате сложения магнитных полей магнита и проводника произойдет усиление результирующего магнитного поля с одной стороны проводника (на чертеже сверху) и ослабление магнитного поля с другой стороны проводника (на чертеже снизу). В результате действия двух магнитных полей

произойдет искривление магнитных линий и они, стремясь сократиться, будут выталкивать проводник вниз (фиг. 96, *б*).

Направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, можно определить по «правилу левой руки». *Если левую руку расположить в магнитном поле так, чтобы магнитные линии, выходящие из северного полюса, как бы входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца совпадали с направлением тока в проводнике, то большой отогнутый палец руки покажет направление действия силы* (фиг. 97).



Фиг. 97. Определение направления силы, действующей на проводник по «правилу левой руки»



Фиг. 98. Зависимость направления силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, от направления поля и направления тока в проводнике

Из фиг. 98 видно, что направление силы, действующей на проводник, можно изменить, либо меняя полюсы и изменяя этим направление магнитного поля (фиг. 98, *а* и *б*, а также *в* и *г*), либо меняя направление тока в проводнике (фиг. 98, *а* и *в*, а также *б* и *г*).

Если же поменять и полюсы и направление тока в проводнике одновременно, то направление силы, действующей на проводник, не изменится (фиг. 98, *а* и *г*, а также *б* и *в*).

Сила ΔF, действующая на элемент длины Δl проводника, зависит: от величины магнитной индукции B, величины тока в проводнике I, от элемента длины Δl проводника и от синуса угла α между направлением элемента длины Δl проводника и направлением магнитного поля. Эта зависимость может быть выражена формулой:

$$\Delta F = BI\Delta l \sin \alpha.$$

Для прямолинейного проводника конечной длины, помещенного перпендикулярно к направлению равномерного магнитного поля, сила, действующая на проводник, будет равна:

$$F = BIl.$$

Из последней формулы определим размерность магнитной индукции.

Так как размерность силы

$$[F] = \frac{дж}{м} = \frac{вт \cdot сек}{м} = \frac{в \cdot а \cdot сек}{м},$$

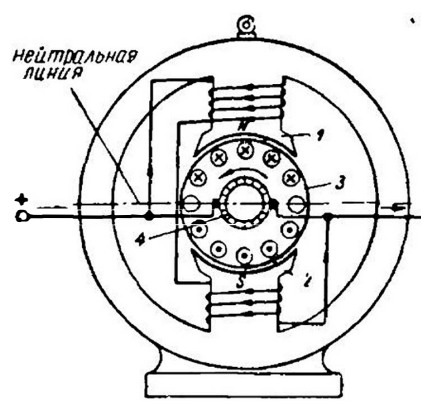
то размерность магнитной индукции

$$[B] = \frac{[F]}{[I]\,[l]} = \frac{\frac{в \cdot а \cdot сек}{м}}{а \cdot м} = \frac{в \cdot сек}{м^2},$$

т. е. размерность индукции такая же, какая была получена нами из закона Био и Савара.

§ 67. Принцип действия электродвигателя

Электродвигателем называется машина, которая преобразовывает электрическую энергию в механическую. Первый электрический двигатель был построен в 1838 г. русским академиком Б. С. Якоби. Все электродвигатели работают на принципе взаимодействия проводника с током и магнитного поля. На фиг. 99 показана схема устройства электродвигателя постоянного тока. Магнитное поле здесь создают полюсы *1* и *2* электромагнита.



Фиг. 99. Схема электрического двигателя

Проводники, по которым пропускается ток, расположены в пазах стального барабана якоря *3*.

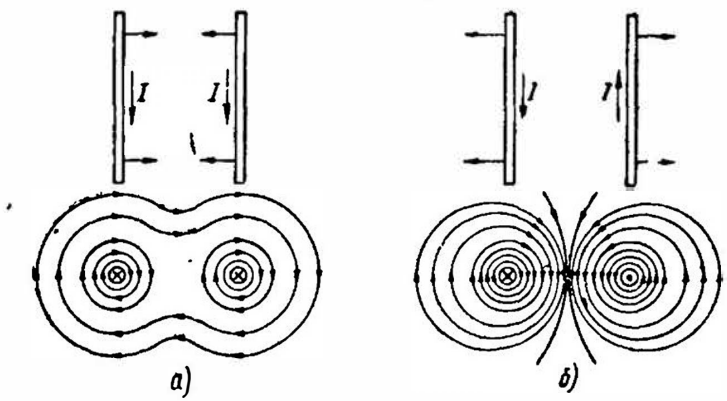
Если пропустить по проводникам верхней половины якоря ток «от нас», а в нижней половине якоря — «к нам», то по «правилу левой руки» проводники верхней половины якоря будут выталкиваться из магнитного поля влево, а проводники нижней половины — вправо. Так как проводники якоря лежат в пазах его, то, выталкиваясь из магнитного поля, они будут поворачивать якорь.

Из фигуры видно, что если проводник с направлением тока «от нас» перейдет вниз и станет против южного полюса электромагнита, то он начнет выталкиваться влево, что будет мешать якорю поворачиваться. То же самое случится, если проводник с направлением тока «к нам» из нижней половины якоря перейдет наверх и станет против северного полюса электромагнита.

Поэтому нужно сделать так, чтобы, как только проводник в своем движении перейдет нейтральную линию, направление тока в нем изменилось. В электродвигателях постоянного тока это достигается с помощью специального устройства — коллектора *4*, к которому подведены концы проводников якоря.

§ 68. Взаимодействие проводников с током

Если близко один к другому расположены проводники с токами одного направления, то магнитные линии этих проводников, охватывающие оба проводника, обладая свойством продольного натяжения и стремясь сократиться, будут заставлять проводники притягиваться (фиг. 100, *а*).



Фиг. 100. Взаимодействие двух проводников с токами:
а — протекающими в одну сторону, *б* — протекающими в разные стороны

Магнитные линии двух проводников с токами разных направлений в пространстве между проводниками направлены в одну сторону. Магнитные линии, имеющие одинаковое направление, обладают свойством бокового распора. Поэтому проводники с токами противоположного направления отталкиваются один от другого (фиг. 100, *б*).

Рассмотрим взаимодействие двух параллельных проводов с токами, расположенными на расстоянии a один от другого. Пусть длина проводов равна l.

Магнитная индукция, созданная током I_1 на линии расположения второго проводника, равна:

$$B_1 = \mu\mu_0 \frac{I_1}{2\pi a}.$$

На второй проводник будет действовать сила

$$F_2 = lI_2B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a}.$$

Магнитная индукция, созданная током I_2 на линии расположения первого проводника, будет равна:

$$B_2 = \mu\mu_0 \frac{I_2}{2\pi a},$$

и на первый проводник действует сила

$$F_1 = B_2 l I_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi a},$$

равная по величине силе F_2.

§ 69. Магнитные и немагнитные материалы

В магнитных цепях различных электрических машин, трансформаторов, приборов и аппаратов электротехники, радиотехники и других отраслей техники встречаются разнообразные магнитные и немагнитные материалы.

Свойства магнитного материала характеризуются величинами напряженности магнитного поля, магнитного потока, магнитной индукции и магнитной проницаемости.

Зависимость между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля, выраженная графически, образует кривую, называемую петлей гистерезиса. Пользуясь этой кривой, можно получить ряд данных, характеризующих магнитные свойства материала.

Переменное магнитное поле вызывает появление в магнитных материалах вихревых токов. Эти токи нагревают сердечники (магнитопроводы), что приводит к затрате некоторой мощности.

Для характеристики материала, работающего в переменном магнитном поле, суммарное значение мощности, затрачиваемой на гистерезис и вихревые токи при частоте 50 *гц*, относят к 1 *кг* веса материала. Эта величина называется удельными потерями и выражается в *вт/кг*.

Магнитная индукция того или иного магнитного материала не должна превышать некоторой максимальной величины в зависимости от вида и качества данного материала. Попытки увеличить индукцию приводят к увеличению потерь энергии в данном материале и нагреву его.

Магнитные материалы делятся на две группы: магнитно-мягкие и магнитно-твердые.

Магнитно-мягкие материалы. Магнитно-мягкие материалы должны отвечать следующим требованиям:

1) обладать большой относительной магнитной проницаемостью μ, позволяющей получать большую магнитную индукцию B при возможно малом числе ампер-витков;

2) иметь возможно меньшие потери на гистерезис и вихревые токи;

3) обладать стабильностью магнитных свойств.

Магнитно-мягкие материалы используются в качестве магнитопроводов электрических машин, сердечников трансформаторов, дросселей, электромагнитов реле, электроизмерительных приборов и т. п. Рассмотрим некоторые магнитно-мягкие материалы.

Электролитическое железо получают путем электролиза сернокислого или хлористого железа с последующей плавкой в вакууме продуктов электролиза. Измельченное в порошок электролитическое железо идет на изготовление магнитных деталей по типу изготовления керамики или пластмасс.

Карбонильное железо получается в виде порошка в результате термического разложения вещества, в состав которого входит железо, углерод и кислород [$Fe(CO)_5$]. При температуре 1200° порошок карбонильного железа спекается и идет на изготовление таких же деталей, которые выполняются из электролитического железа. Карбонильное железо отличается высокой чистотой и пластичностью; применяется в электровакуумной промышленности, а также в приборостроении для изготовления лабораторных инструментов и приборов.

Рассмотренные нами два вида особо чистого железа (электролитическое и карбонильное) содержат не более 0,05% примесей.

Листовая электротехническая сталь является наиболее распространенным материалом в электромашиностроении и трансформаторостроении. Электротехническая сталь легируется кремнием для улучшения ее магнитных свойств и уменьшения потерь на гистерезис. Кроме того, в результате введения кремния в состав стали увеличивается ее удельное сопротивление, что приводит к уменьшению потерь на вихревые токи. Толщина листа в зависимости от марки стали 0,3 и 0,5 *мм*. Электротехническая сталь, прокатанная в холодном состоянии с последующим отжигом в атмосфере водорода, имеет особо высокие магнитные свойства. Это объясняется тем, что кристаллы металла располагаются параллельно направлению прокатки. Такая сталь обозначается буквами ХВП (холоднокатаная высокой проницаемости, текстурованная). Листы стали имеют размеры от 1000×700 до 2000×1000 *мм*.

Марки электротехнической стали раньше обозначались, например, так: Э3А, Э1АБ, Э4АА. Буква Э означает — электротехническая сталь; буква А — пониженные потери мощности в переменном магнитном поле; буквы АА—особо низкие потери; буква Б — повышенная магнитная индукция; цифры 1—4 показывают количество содержащегося в стали кремния в процентах.

Согласно ГОСТ 802—54, введены новые обозначения марок электротехнической стали, например: Э11, Э21, Э320, Э370, Э43. Здесь буква Э означает — электротехническая сталь; первые цифры: 1 — слаболегированная кремнием; 2 — среднелегированная кремнием; 3 — повышениолегированная кремнием и 4 — вы-

соколегированная кремнием. Вторые цифры в обозначении марок указывают на следующие гарантированные магнитные и электрические свойства сталей: 1, 2, 3 — удельные потери при перемагничивании сталей при частоте 50 *гц* и магнитная индукция в сильных полях; 4 — удельные потери при перемагничивании сталей при частоте 400 *гц* и магнитная индукция в средних полях; 5, 6 — магнитная проницаемость в слабых полях (*H* менее 0,01 *а/см*); 7, 8 — магнитная проницаемость в средних полях (*H* от 0,1 до 1 *а/см*). Третья цифра 0 указывает на то, что сталь холоднокатаная, текстурованная.

Пермаллой — сплав железа и никеля. Примерный состав пермаллоя: 30—80% никеля, 10—18% железа, остальное — медь, молибден, марганец, хром. Пермаллой хорошо обрабатывается и выпускается в виде листов. Обладает очень высокой магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях (до 200 000 *гн/см*). Пермаллой применяется для изготовления деталей телефонной и радиотехнической связи, сердечников трансформаторов, катушек индуктивности, реле, деталей электроизмерительных приборов.

Альсифер — сплав алюминия, кремния и железа. Примерный состав альсифера: 9,5% кремния, 5,6% алюминия, остальное — железо. Альсифер — твердый и хрупкий сплав, поэтому он обрабатывается с трудом. Преимущества альсифера — высокая магнитная проницаемость в слабых магнитных полях (до 110 000 *гн/см*), большое удельное сопротивление ($\rho = 0{,}81$ *ом · мм²/м*), отсутствие в его составе дефицитных металлов. Применяется для изготовления сердечников, работающих в высокочастотных установках.

Пермендюр — сплав железа с кобальтом и ванадием (50% кобальта, 1,8% ванадия, остальное — железо). Пермендюр выпускается в виде листов, полос и лент. Применяется для изготовления сердечников электромагнитов, динамических репродукторов, мембран, телефонов, осциллографов и т. п.

Магнитодиэлектрики — магнитно-мягкие материалы, раздробленные в мелкие зерна (порошок), которые изолируются одно от другого смолами или другими связками. В качестве порошка магнитного материала применяется электролитическое железо, карбонильное железо, пермаллой, альсифер, магнетит (минерал $FeO \cdot Fe_2O_3$). Изолирующими связками являются: шеллак, фенолоформальдегидные смолы, полистирол, жидкое стекло и др. Порошок магнитного материала смешивают с изолирующей связкой, тщательно перемешивают и из полученной массы прессуют под давлением сердечники трансформаторов, дросселей, детали радиоаппаратуры. Зернистое строение магнитодиэлектрических материалов обусловливает малые потери на вихревые токи при работе этих материалов в магнитных полях токов высокой частоты.

Магнитно-твердые материалы. Магнитно-твердые материалы применяются для изготовления постоянных магнитов. Эти материалы должны отвечать следующим требованиям:

1) обладать большой остаточной индукцией;
2) иметь большую максимальную магнитную энергию;
3) обладать стабильностью магнитных свойств.

Самым дешевым материалом для постоянных магнитов является углеродистая сталь (0,4—1,7% углерода, остальное — железо). Магниты, изготовленные из углеродистой стали, обладают невысокими магнитными свойствами и быстро теряют их под влиянием нагрева, ударов и сотрясений.

Легированные стали обладают лучшими магнитными свойствами и применяются для изготовления постоянных магнитов чаще, чем углеродистая сталь. К таким сталям относятся хромистая, вольфрамовая, кобальтовая и кобальто-молибденовая.

Для изготовления постоянных магнитов в технике разработаны сплавы на основе железа — никеля — алюминия. Эти сплавы отличаются высокой твердостью и хрупкостью, поэтому они могут обрабатываться только шлифованием. Сплавы обладают исключительно высокими магнитными свойствами и большой магнитной энергией в единице объема.

В табл. 15 приведены данные о составе некоторых магнитно-твердых материалов для изготовления постоянных магнитов.

Таблица 15

Химический состав магнитно-твердых материалов

Наименование материала	Химический состав в весовых процентах	Относительный вес на единицу магнитной энергии
Углеродистая сталь	0,45 C остальное Fe	26,7
Хромистая сталь	2—3 Cr; 1 C	17,2
Вольфрамовая сталь	5W; 1 C	15,8
Кобальтовая сталь	5—30 Co; 5—8 Cr; 1,5—5W	5,1—12,6
Кобальто-молибденовая сталь	13—17 Mo; 10—12 Co	3,8
Альни	12,5 Al; 25 Ni; 5 Cu	3,6
Альнисн	14 Al; 34 Ni; 1 Si	3,4
Альнико	10Al; 17Ni; 12 Co; 6 Cu	3,1
Магнико	24 Co; 13 Si; 8 Al; 3 Cu	1

Немагнитные материалы. В различных приборах и аппаратах, применяемых в электротехнике, необходимо иметь материал, не обладающий магнитными свойствами. Для таких целей пригодны пластмасса и цветные металлы (алюминий, латунь, бронза). Однако эти материалы обладают малой механической прочностью, а некоторые из них дефицитны. В связи с этим они заменяются немагнитной сталью и немагнитным чугуном.

Примерный состав немагнитной стали: 0,25—0,35% углерода, 22—25% никеля, 2—3% хрома, остальное — железо. Немагнит-

ная сталь применяется для стяжки и крепления трансформаторов, дросселей, катушек индуктивности и т. п.

Примерный состав немагнитного чугуна: 2,6—3% углерода, 2,5% кремния, 5,6% марганца, 9—12% никеля, остальное — железо.

Немагнитный чугун применяется для изготовления крышек, кожухов, втулок, масляных выключателей, кабельных муфт, кожухов сварочных трансформаторов.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить напряженность магнитного поля, создаваемого током 100 *а*, проходящим по длинному прямолинейному проводнику в точке, удаленной от проводника на 10 *см*.

2. Определить напряженность магнитного поля, создаваемого током 20 *а*, проходящим по кольцевому проводнику радиусом 5 *см* в точке, расположенной в центре витка.

3. Определить магнитный поток, проходящий в куске никеля, помещенного в однородное магнитное поле напряженностью 500 *а/м*. Площадь поперечного сечения куска никеля 25 *см*^{2}. Относительная магнитная проницаемость никеля 300.

4. Прямолинейный проводник длиной 40 *см* помещен в равномерное магнитное поле под углом 30° к направлению магнитного поля. По проводнику проходит ток 50 *а*. Индукция поля равна 5000 *гс*. Определить силу, с которой проводник выталкивается из магнитного поля.

5. Определить силу, с которой два прямолинейных, параллельно расположенных в воздухе проводника отталкиваются один от другого. Длина проводников 2 *м*, расстояние между ними 20 *см*. Токи в проводниках по 10 *а*.

Контрольные вопросы

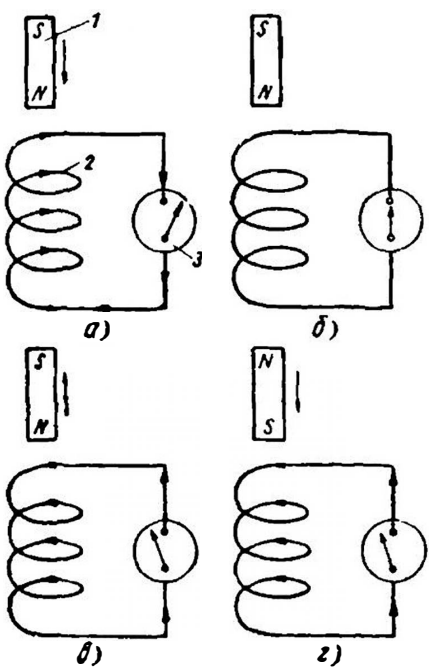
1. На каком опыте можно убедиться, что вокруг проводника с током сбразуется магнитное поле?
2. Каковы свойства магнитных линий?
3. Как определить направление магнитных линий?
4. Что называется соленоидом и каково его магнитное поле?
5. Как определить полюсы солеиоида?
6. Что называется электромагнитом и как определить его полюсы?
7. Что такое гистерезис?
8. Какие бывают формы электромагнитов?
9. Как взаимодействуют между собой проводники, по которым течет электрический ток?
10. Что действует на проводник с током в магнитном поле?
11. Как определить направленне силы, действующей на проводник с током в магнитном поле?
12. На каком принципе основана работа электродвигателей?
13. Какие тела называются ферромагнитными, парамагнитными и диамагнитными?

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 70. Получение индуктированной электродвижущей силы (э. д. с.)

Возьмем постоянный магнит *1* (фиг. 101, *а*) и будем опускать его в катушку *2* (соленоид). Мы увидим, что стрелка гальванометра *3*, включенного в цепь, отклонится (например, вправо). Это указывает на появление э. д. с. и тока в соленоиде.



Фиг. 101. Зависимость направления индуктированной э. д. с. от направления магнитного поля и направления движения магнитного поля по отношению к проводнику

Если прекратить движение магнита, то стрелка гальванометра вернется в нулевое положение (фиг. 101, *б*). Это показывает, что для появления индуктированной э. д. с. мало иметь магнитное поле и проводник, нужно еще, чтобы они двигались одно относительно другого.

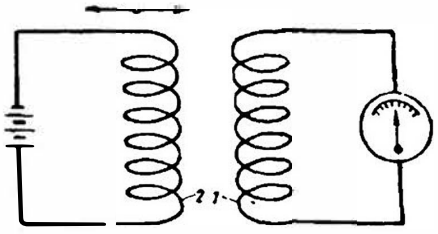
Вынимая магнит из катушки (фиг. 101, *в*), можно заметить, что стрелка гальванометра отклонится, но уже в другую сторону (влево). Это показывает, что направление индуктированной э. д. с. зависит от направления движения магнитного поля, пересекающего неподвижный проводник, или от направления движения проводника, пересекающего магнитное поле.

В приведенном опыте мы видели, что при опускании постоянного магнита в катушку стрелка гальваномет-

ра отклонялась вправо в том случае, когда магнит был расположен северным полюсом вниз (фиг. 101, *а*). Если повернуть магнит северным полюсом вверх и снова опускать в катушку, то стрелка гальванометра отклонится в другую сторону, т. е. влево (фиг. 101, *г*). Это показывает, что направление индуктированной э. д. с. зависит еще от направления магнитного поля.

Явление возникновения э. д. с. в контуре при пересечении его магнитным полем называется электромагнитной индукцией и было открыто английским физиком М. Фарадеем в 1831 г.

Если к замкнутому проводнику *1* (фиг. 102), не имеющему тока, приближать или удалять проводник *2*, по которому проходит электрический ток, то в проводнике *1* будет индуктироваться э. д. с. Точно так же, если оба проводника *1* и *2* оставлять неподвижными, но менять ток либо разрывать или замыкать цепь, в которую входит проводник *2*, то в проводнике *1* будет появляться индуктированная э. д. с. Возникновение э. д. с. во втором контуре вследствие изменения тока в первом контуре называется взаимоиндукцией. Она имеет место в трансформаторах, индукционных катушках и т. д. Индуктированную э. д. с. можно получить еще следующим образом.



Фиг 102 Взаимоиндукция

Известно, что проводник, по которому течет электрический ток, окружен магнитным полем. Если изменять величину или направление тока в проводнике или размыкать и замыкать электрическую цепь, питающую проводник током, то магнитное поле, окружающее проводник, будет изменяться. Изменяясь, магнитное поле проводника пересекает этот же самый проводник и наводит в нем э. д. с. Это явление называется самоиндукцией. Сама индуктированная э. д. с. называется э. д. с. самоиндукции.

§ 71. Направление и величина индуктированной э. д. с.

Индуктированная э. д. с. возникает в следующих трех случаях:

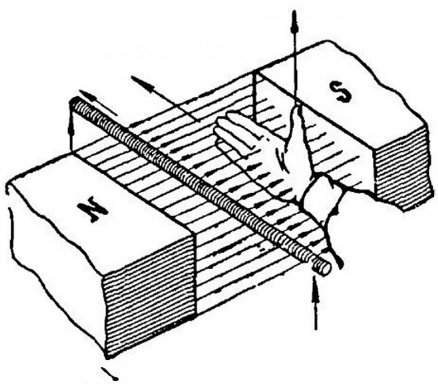
1. Когда движущийся проводник пересекает неподвижное магнитное поле или, наоборот, перемещающееся магнитное поле пересекает неподвижный проводник; или когда проводник и маг-

нитное поле, двигаясь в пространстве, перемещаются один относительно другого.

2. Когда переменное магнитное поле одного проводника, действуя на другой проводник, индуктирует в нем э. д. с. (взаимоиндукция).

3. Когда изменяющееся магнитное поле проводника индуктирует в нем самом э. д. с. (самоиндукция).

Таким образом, всякое изменение во времени величины магнитного потока, пронизывающего замкнутый проводящий контур (виток, рамку), сопровождается появлением в проводнике индуктированной э. д. с.



Фиг. 103. Определение направления индуктированной э. д. с. в проводнике по «правилу правой руки»

Как было отмечено выше, направление индуктированной э. д. с. зависит от направления движения проводника и от направления магнитного поля.

Для определения направления индуктированной э. д. с. в проводнике служит «правило правой руки». Оно заключается в следующем: *если мысленно расположить правую руку в магнитном поле вдоль проводника так, чтобы магнитные линии, выходящие из северного полюса, входили в ладонь, а большой отогнутый палец совпадал с направлением движения проводника, то четыре вытянутых пальца будут показывать направление индуктированной э. д. с. в проводнике* (фиг. 103).

В случаях, когда проводник остается неподвижным, а магнитное поле движется, для определения направления индуктированной э. д. с. нужно предположить, что поле остается неподвижным, а проводник движется в сторону, обратную движению поля, и применить также «правило правой руки».

Явление индуктированной э. д. с. можно также объяснить при помощи электронной теории.

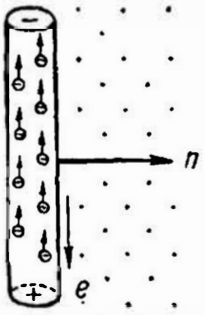
Поместим проводник в магнитное поле. Свободные электроны проводника будут находиться в беспорядочном тепловом движении. Положительные и отрицательные заряды равномерно расположены по всему объему проводника и взаимно нейтрализуют друг друга. Будем пермещать проводник с определенной скоростью в однородном магнитном поле в направлении *n* (фиг. 104) перпендикулярно вектору магнитной индукции. Магнитные линии, показанные точками, направлены из-за пло-

скости чертежа к читателю. Вместе с проводником перемещаются его атомы и их ядра и электроны.

На электрические заряды проводника в этом случае будет действовать сила, под действием которой свободные электроны получат добавочную составляющую скорости и будут двигаться вдоль проводника.

В то время как положительные заряды, связанные с кристаллической решеткой проводника, относительно проводника не смещаются, движущиеся вместе с проводником свободные электроны могут перемещаться относительно него.

В нашем примере электроны движутся от нижнего края проводника к его верхнему краю, что соответствует направлению тока сверху вниз. Направление индуктированной э. д. с. и тока в проводнике, как легко убедиться, согласуется с правилом правой руки.



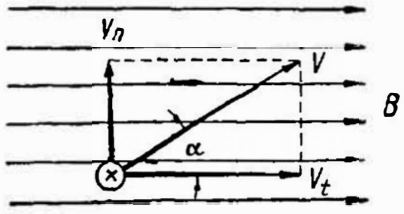
Фиг. 104. Электромагнитная индукция в проводнике

Величина индуктированной э. д. с. в проводнике зависит:

1) от величины индукции B магнитного поля, так как чем гуще расположены магнитные индукционные линии, тем большее число их пересечет проводник за единицу времени (секунду);

2) от скорости движения проводника v в магнитном поле, так как при большой скорости движения проводник может больше пересечь индукционных линий в секунду;

3) от рабочей (находящейся в магнитном поле) длины проводника l, так как длинный проводник может больше пересечь индукционных линий в секунду;



Фиг. 105. Разложение скорости движения проводника в магнитном поле

4) от величины синуса угла α между направлением движения проводника и направлением магнитного поля (фиг. 105).

Раскладываем вектор скорости движения проводника в магнитном поле на две составляющие: v_n — составляющую нормальную к направлению поля ($v_n = v \cdot \sin \alpha$) и v_t — тангенциальную составляющую ($v_t = v \cdot \cos \alpha$), которая не принимает участия в создании э. д. с., так как при движении под воздействием тангенциальной составляющей проводник двигался бы параллельно вектору B и не пересекал бы линий магнитной индукции.

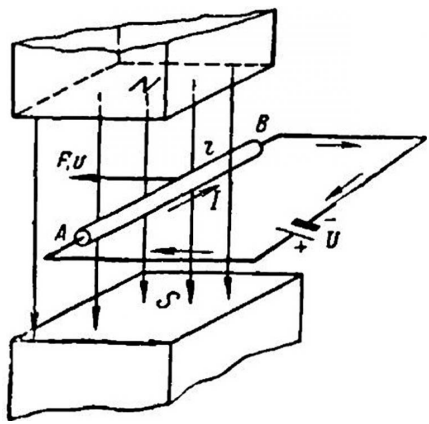
Величина индуктированной э. д. с. может быть найдена по формуле:

$$e = Blv \sin \alpha \ в.$$

Познакомившись с явлением электромагнитной индукции, рассмотрим еще раз процесс преобразования электрической энергии в механическую.

Пусть прямолинейный проводник AB (фиг. 106), по которому проходит ток от источника напряжения, помещен во внешнее магнитное поле. Если проводник неподвижен, то энергия источника напряжения расходуется исключительно на нагрев проводника:

$$A = UIt = I^2rt \ дж.$$



Фиг. 106. Преобразование электрической энергии в механическую

Затрачиваемая мощность будет равна:

$$P_{эл} = UI = I^2r \ вт,$$

откуда определяем ток в цепи:

$$I = \frac{U}{r} a. \qquad (а)$$

Однако нам известно, что проводник с током, помещенный в магнитное поле, будет испытывать силу со стороны поля, стремящуюся перемещать проводник в магнитном поле в направлении, определяемом правилом левой руки. При своем движении проводник будет пересекать магнитные линии поля и в нем по закону электромагнитной индукции возникнет индуктированная э. д. с. Направление этой э. д. с., определенное по правилу правой руки, будет обратным току I. Назовем ее обратной э. д. с. $E_{обр}$. Величина $E_{обр}$ согласно закону электромагнитной индукции будет равна:

$$E_{обр} = Blv \ в.$$

По второму закону Кирхгофа для замкнутой цепи имеем:

$$U - E_{обр} = Ir$$

или

$$U = E_{обр} + Ir, \qquad (б)$$

откуда ток в цепи

$$I = \frac{U - E_{обр}}{r}. \qquad (в)$$

Сравнивая выражения (а) и (в), видим, что в проводнике, движущемся в магнитном поле, при одних и тех же значениях U и r ток будет меньше, чем при неподвижном проводнике.

Умножая почленно выражение (б) на I, получим:

$$UI = E_{обр}I + I^2r.$$

Так как $E_{обр} = Blv$, то

$$UI = BlvI + I^2r.$$

Учитывая, что $BlI = F$ и $Fv = P_{мех}$, имеем:

$$UI = Fv + I^2r$$

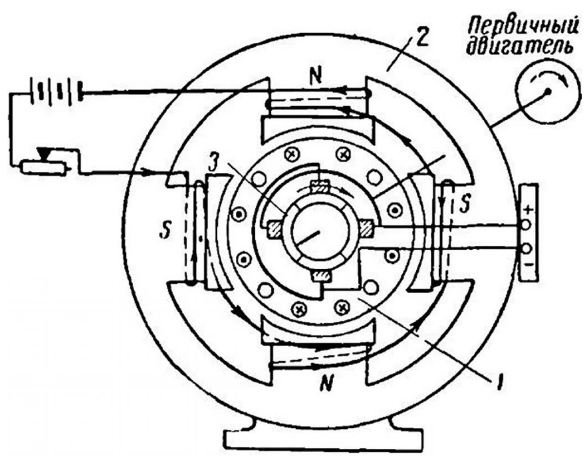
или

$$P = P_{мех} + P_{эл}.$$

Последнее выражение показывает, что при движении проводника с током в магнитном поле мощность источника напряжения преобразуется в тепловую и механическую мощности.

§ 72. Принцип действия генератора

Генератором называется машина, преобразующая механическую энергию в электрическую. Работа генератора основана на использовании явления электромагнитной индукции. В генераторе якорь *1* (фиг. 107) с обмоткой вращается первичным двигателем в магнитном поле полюсов *N* и *S* электромагнитов *2*. Электродвижущая сила, индуктируемая в проводниках обмотки якоря при помощи коллектора *3* и щеток, отводится во внешнюю цепь. Благодаря наличию коллектора ток, отдаваемый обмоткой якоря во внешнюю цепь, будет постоянным.



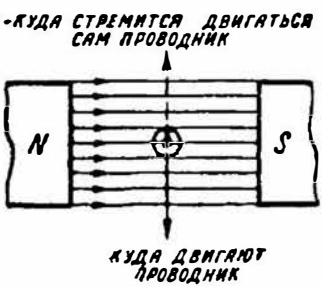
Фиг. 107. Схема генератора постоянного тока

Для вращения генератора в качестве первичного двигателя можно применить паровую машину, паровую турбину, водяную турбину, двигатель внутреннего сгорания, ветряной двигатель, электрический двигатель.

§ 73. Правило Ленца

В 1834 г. русский академик Э. Х. Ленц, известный своими многочисленными исследованиями в области электромагнитных явлений, дал универсальное правило для определения направления индуктированной э. д. с. в проводнике. Это правило, известное как правило Ленца, может быть сформулировано так:

Направление индуктированной э. д. с. всегда таково, что вызванный ею ток и его магнитное поле имеют такое направление, что стремятся препятствовать причине, порождающей эту индуктированную э. д. с.



Фиг. 108. Противодействие проводника с индуктированным током своему движению

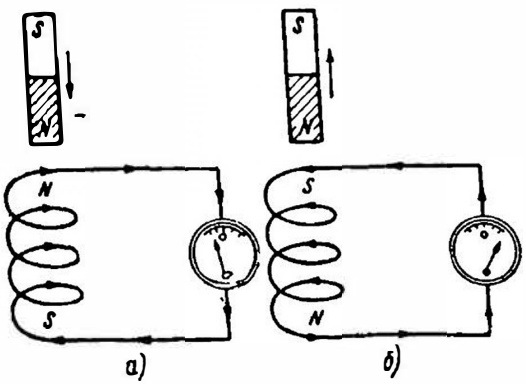
Справедливость правила Ленца подтверждается следующим:

1. Если расположить проводник в магнитном поле так, как показано на фиг. 108, то при движении вниз проводник будет пересекать это магнитное поле. Тогда в проводнике индуктируется э. д. с., направление которой можно определить по правилу правой руки. В нашем случае направление индуктированной э. д. с., а стало быть и тока будет «к нам». Посмотрим теперь, как будет вести себя наш проводник с током в магнитном поле. Из предыдущего нам известно, что проводник с током из магнитного поля будет выталкиваться. Направление выталкивания определяется по правилу левой руки. В нашем случае сила выталкивания направлена вверх. Таким образом, индуктированный ток, взаимодействуя с магнитным полем, мешает движению проводника, т. е. противодействует причине, которая его вызвала.

2. Для опыта соберем цепь, показанную на фиг. 109. Опуская постоянный магнит в катушку (северным полюсом вниз), заметим отклонение стрелки гальванометра. Опыт показывает, что направление индуктированного тока в катушке будет такое, как показано стрелками на фиг. 109, *а*. Пусть ему соответствует отклонение стрелки влево от среднего нулевого положения. Следовательно, катушка как бы превратилась в соленоид и указанное направление тока создает наверху ее северный полюс, а внизу — южный. Так как одноименные полюса магнита и соленоида будут отталкиваться, то индуктированный ток в катушке бу-

дет мешать движению постоянного магнита, т. е. будет противодействовать причине, которая его вызвала.

Если мы будем вынимать постоянный магнит из катушки, то стрелка гальванометра отклонится вправо (фиг. 109, *б*). Этому отклонению стрелки гальванометра, как показывает опыт, соответствует направление индуктированного тока, показанное стрелками на фиг. 109, *б*, и противоположное направлению тока на фиг. 109, *а*.



Фиг. 109. Противодействие соленоида движению магнита:
а — вниз, *б* — вверх

Определяя полюса катушки по «правилу буравчика», найдем, что южный полюс будет теперь наверху катушки, а северный внизу. Разноименные полюса магнита и соленоида, притягиваясь, будут тормозить движение магнита. Значит, индуктированный ток опять будет противодействовать причине, которая его вызвала.

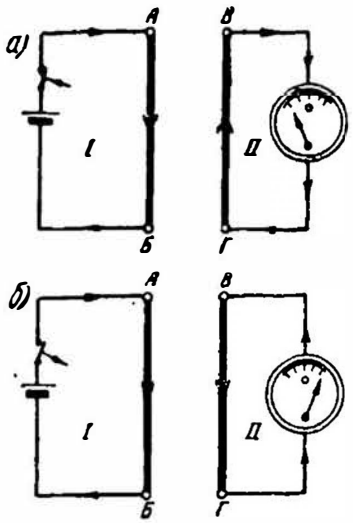
3. Замыкая цепь *I* (фиг. 110, *а*), пропустим ток по проводнику *АБ*. Направление тока показано на рисунке стрелками. Магнитное поле проводника *АБ*, созданное появившимся током, распространяясь во все стороны, будет пересекать проводник *ВГ*, и в цепи *II* возникает индуктированная э. д. с. Поскольку цепь *II* замкнута на гальванометр, в ней появится ток. Гальванометр в этом случае включен так же, как и в предыдущем опыте.

Стрелка гальванометра, отклонившись влево, покажет, что ток через прибор идет сверху вниз. Сравнивая направление токов в проводниках *АБ* и *ВГ*, мы видим, что токи их направлены в разные стороны.

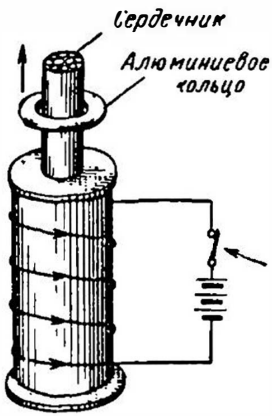
Как мы уже знаем, проводники, токи в которых направлены в разные стороны, отталкиваются один от другого. Поэтому проводник *ВГ* с индуктированным током будет стремиться оттолкнуться от проводника *АБ* (так же, как и проводник *АБ* от

ВГ), устранить влияние поля проводника *АБ* и тем самым препятствовать причине, вызвавшей индуктированный ток.

Индуктированный ток в цепи *II* будет проходить непродолжительное время. Как только магнитный поток проводника *АБ* установится, прекратится пересечение проводника *ВГ* магнитным полем проводника *АБ*, ток в цепи *II* пропадет.



Фиг. 110. Возникновение индуктированного тока по цепи *II*:
а — в момент замыкания цепи *I*.
б — в момент размыкания цепи



Фиг. 111. Алюминиевое кольцо, свободно надетое на стальной сердечник катушки, подскакивает вверх в момент включения тока

При размыкании цепи *I* исчезающий ток вызовет уменьшение магнитного поля, индукционные линии которого, пересекая проводник *ВГ*, создадут в нем индуктированный ток того же направления, что и в проводнике *АБ* (фиг. 110, *б*).

Нам известно, что проводники, в которых ток идет в одном направлении, притягиваются один к другому. Поэтому проводник *ВГ* будет стремиться протянуться к проводнику *АБ*, чтобы поддержать его убывающее магнитное поле.

4. Возьмем катушку, имеющую круглый сердечник, набранный из нарубленной стальной проволоки, на который свободно надето легкое алюминиевое кольцо (фиг. 111). В момент замыкания цепи по обмотке катушки начинает проходить электрический ток, создающий магнитное поле, индукционные линии которого, пересекая алюминиевое кольцо, индуктируют в нем ток. В момент включения катушки в алюминиевом кольце возникает индуктированный ток, направленный обратно току в витках катушки. Проводники с разными направлениями токов отталкива-

ются. Поэтому в момент включения катушки алюминиевое кольцо подскакивает вверх.

Нам теперь известно, что при всяком изменении во времени магнитного потока, пронизывающего контур, в нем появляется индуктированная э. д. с., определяемая равенством:

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Выражение $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ представляет собою среднюю скорость изменения магнитного потока по времени. Чем меньше промежуток времени Δt, тем меньше вышеуказанная э. д. с. отличается от ее действительного значения в данный момент времени. Знак минус, стоящий перед выражением $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, показывает направление индуктированной э. д. с., т. е. учитывает правило Ленца.

При увеличении магнитного потока выражение $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ будет положительным, а э. д. с. — отрицательной. В этом и заключается правило Ленца: э. д. с. и созданный ею ток противодействуют причине, которая их вызвала.

При равномерном изменении во времени магнитного потока выражение $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ будет постоянно. Тогда абсолютное значение э. д. с. в проводнике будет равно:

$$e = \frac{\Phi}{t}.$$

Размерность магнитного потока будет:

$$[\Phi] = [e \cdot t] = в \cdot сек \text{ или вебер.}$$

Если мы имеем не один проводник, а катушку, состоящую из w витков, то величина индуктированной э. д. с. будет:

$$e = -w\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Произведение числа витков катушки на сцепленный с ними магнитный поток называется потокосцеплением катушки и обозначается буквой ψ. Поэтому закон электромагнитной индукции можно записать и в другой форме:

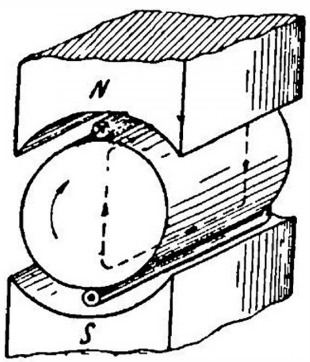
$$e = -\frac{\Delta\psi}{\Delta t}.$$

§ 74. Вихревые токи

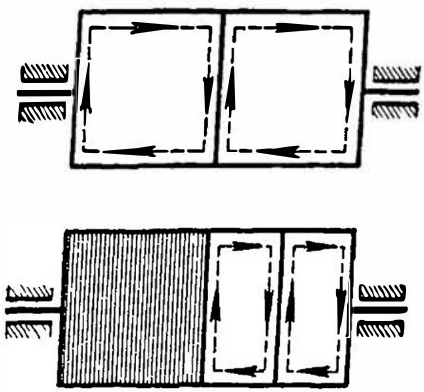
Рассматривая принцип действия генератора, мы видели, что при его вращении в проводниках обмотки якоря, пересекающих магнитное поле, индуктируется э. д. с. Так как и сам стальной

якорь пересекает те же магнитные индукционные линии, то в нем, так же как и в проводнике, должны индуктироваться токи. Токи, которые индуктируются в металлических телах при пересечении их магнитными линиями, называются вихревыми токами, или токами Фуко.

На фиг. 112 схематически изображен якорь, вращающийся в магнитном поле. Вихревые токи в якоре, условно показанные пунктирными стрелками, проходя по телу якоря, будут нагревать его, на что затрачивается энергия. Если не принять мер к



Фиг. 112. Возникновение вихревых токов в сплошном стальном якоре электрической машины



Фиг. 113. Изменение пути вихревых токов при разделении стального якоря электрической машины на изолированные участки. Стрелками показаны направления индукционных токов

уменьшению вихревых токов, они, сильно нагревая якорь, могут привести к порче изоляции его обмотки. Уничтожить совсем потери на вихревые токи нельзя, но уменьшить их можно и нужно.

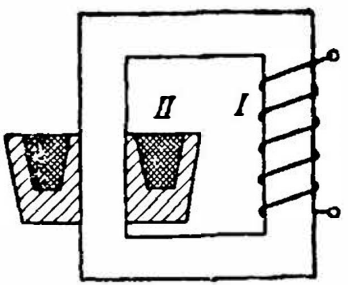
Для уменьшения потерь на вихревые токи якори генераторов, электрических двигателей и сердечники трансформаторов собирают из отдельных тонких (0,35—0,5 *мм*) штампованных листов мягкой стали, расположенных по направлению линий магнитного потока и изолированных один от другого лаком или тонкой бумагой. Это делается для того, чтобы вследствие малого поперечного сечения каждого стального листа уменьшить величину проходящего через него магнитного потока, а стало быть уменьшить индуктируемые в нем э. д. с. и ток.

Путь вихревых токов в теле якоря при разделении последнего на отдельные изолированные участки схематически показан на фиг. 113.

Чтобы еще больше ослабить вихревые токи, увеличивают

удельное сопротивление стали путем добавления в нее около 4% кремния. Такая сталь называется легированной.

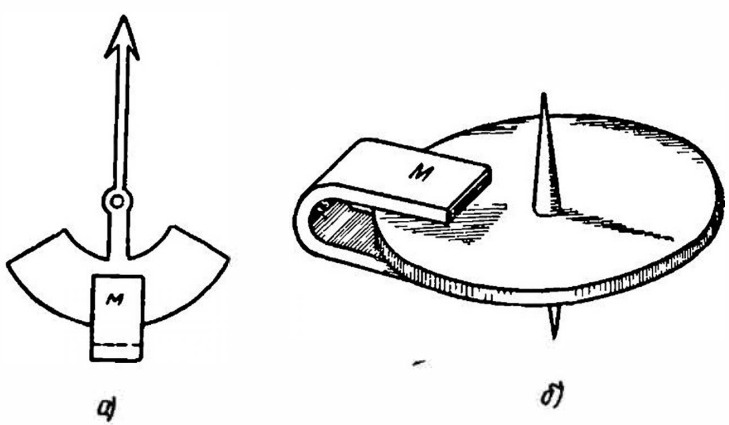
Однако не всегда вихревые токи являются вредными; в некоторых случаях они находят и полезное применение. Так, например, эти токи используют для закалки стальных изделий токами высокой частоты, в работе индукционных электроизмерительных приборов, счетчиков и реле переменного тока (описанных ниже).



Фиг. 114. Схема устройства индукционной печи

В индукционных печах (фиг. 114) вихревые токи, наводимые первичной обмоткой *I* во вторичной обмотке *II*, которой является масса металла, настолько сильны и количество тепла, выделяемое ими, так велико, что металл плавится.

В измерительных приборах часто устраивают магнитоиндукционные тормозы (фиг. 115). При колебаниях стрелки (фиг. 115, *а*) или при вращении диска (фиг. 115, *б*) они пересекают поле магнита *M* и в них индуктируются вихревые токи, которые по пра-



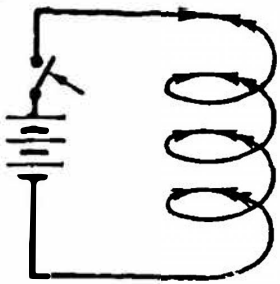
Фиг. 115. Магнитоиндукционные тормозы

вилу Ленца имеют такое направление, что противодействуют вызвавшей их причине. Таким образом, эти токи будут тормозить вращение диска и уменьшать колебания стрелки, быстро ее успокаивая.

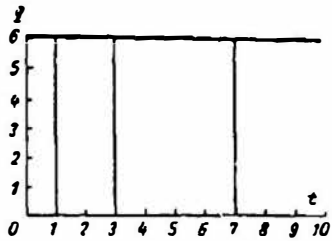
§ 75. Э. д. с. самоиндукции и индуктивность цепи

При замыкании выключателя в цепи, представленной на фиг. 116, возникнет электрический ток, направление которого показа-

но одинарными стрелками. С появлением тока возникает магнитное поле, индукционные линии которого пересекают проводник и индуктируют в нем э. д. с. Как было указано выше, эта э. д. с. называется э. д. с. самоиндукции. Так как всякая индук-

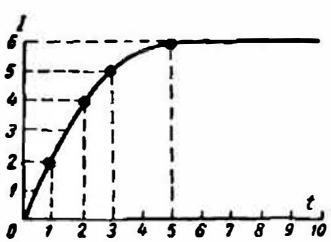


Фиг. 116. Электродвижущая сила самоиндукции в момент замыкания цепи направлена против э. д. с. источника напряжения

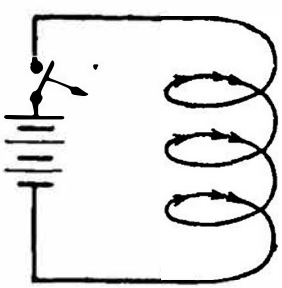


Фиг. 117. График постоянного тока

тированная э. д. с. по правилу Ленца направлена против причины, ее вызвавшей, а этой причиной будет э. д. с. батареи элементов, то э. д. с. самоиндукции будет направлена против э. д. с. батареи. Направление э. д. с. самоиндукции на фиг. 116 показано двойными стрелками.



Фиг. 118. График нарастания тока в цепи с учетом э. д. с. самоиндукции



Фиг. 119 Э. д. с. самоиндукции в момент размыкания цепи направлена одинаково с э. д. с. источника напряжения

Таким образом, ток устанавливается в цепи не сразу. Только когда магнитный поток установится, пересечение проводника магнитными линиями прекратится и э. д. с. самоиндукции исчезнет. Тогда в цепи будет протекать постоянный ток.

На фиг. 117 дано графическое изображение постоянного тока.

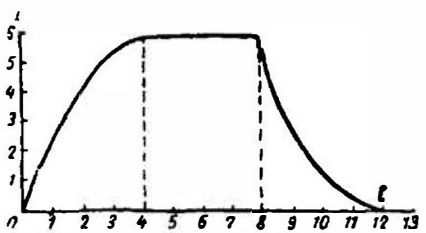
По горизонтальной оси отложено время, по вертикальной оси — ток. Из рисунка видно, что если в первый момент времени ток равен 6 *а*, то в третий, седьмой и т. д. моменты времени он также будет равен 6 *а*.

На фиг. 118 показано, как устанавливается ток в цепи после включения. Э. д. с. самоиндукции, направленная в момент включения против э. д. с. батареи элементов, ослабляет ток в цепи, и поэтому в момент включения ток равен нулю. Далее в первый момент времени ток равен 2 *а*, во второй момент времени — 4 *а*, в третий — 5 *а*, и только спустя некоторое время в цепи устанавливается ток 6 *а*.

При размыкании цепи (фиг. 119) исчезающий ток, направление которого показано одинарной стрелкой, будет уменьшать свое магнитное поле. Это поле, уменьшаясь от некоторой величины до нуля, будет вновь пересекать проводник и индуктировать в нем э. д. с. самоиндукции.

При выключении цепи э. д. с. самоиндукции будет направлена в ту же сторону, что и э. д. с. источника напряжения. Направление э. д. с. самоиндукции показано на фиг. 119 двойной стрелкой. В результате действия э. д. с. самоиндукции ток в цепи при ее размыкании исчезает не сразу.

Таким образом, э. д. с. самоиндукции всегда направлена против причины, ее вызвавшей. Отмечая это ее свойство, говорят что э. д. с. самоиндукции имеет реактивный характер.



Фиг. 120. График нарастания и исчезновения тока в цепи с учетом э. д. с. самоиндукции

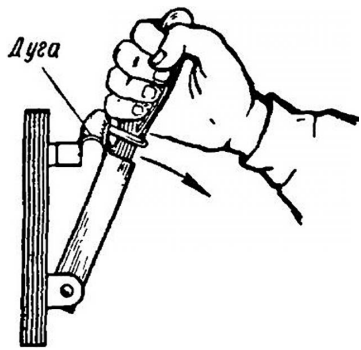
Графически изменение тока в нашей цепи с учетом э. д. с. самоиндукции при замыкании ее и при последующем размыкании в восьмой момент времени показано на фиг. 120.

При размыкании цепей, содержащих большое количество витков и массивные стальные сердечники или, как говорят, обладающих большой индуктивностью, э. д. с. самоиндукции может быть во много раз больше э. д. с. источника напряжения. Тогда в момент размыкания воздушный промежуток между ножом и неподвижным зажимом рубильника будет пробит и появившаяся электрическая дуга будет плавить медные части рубильника, а при отсутствии кожуха на рубильнике может ожечь руку человека (фиг. 121).

В самой цепи э. д. с. самоиндукции может пробить изоляцию витков катушек, электромагнитов и т. д. Во избежание этого в некоторых выключающих приспособлениях устраивают специальный контакт, который замыкает накоротко обмотку электромагнита при выключении.

Следует учитывать, что э. д. с. самоиндукции проявляет себя не только в моменты включения и выключения цепи, но также и при всяких изменениях тока.

Величина э. д. с. самоиндукции зависит от скорости изменения тока в цепи. Так, например, если для одной и той же цепи в одном случае в течение 1 сек. ток в цепи изменился с 50 до 40 *а* (т. е. на 10 *а*), а в другом случае с 50 до 20 *а* (т. е. на 30 *а*), то во втором случае в цепи будет индуктироваться втрое бо́льшая э. д. с. самоиндукции.



Фиг. 121. Индукционные токи при размыкании цепи

Величина э. д. с. самоиндукции зависит также от индуктивности самой цепи. Цепями с большой индуктивностью являются обмотки генераторов, электродвигателей, трансформаторов и индукционных катушек, обладающих стальными сердечниками. Меньшей индуктивностью обладают прямолинейные проводники. Короткие прямолинейные проводники, лампы накаливания и электронагревательные приборы (печи, плитки) индуктивностью практически не обладают и появления э. д. с. самоиндукции в них почти не наблюдается.

Магнитный поток, пронизывающий контур и индуктирующий в нем э. д. с. самоиндукции, пропорционален току, протекающему по контуру:

$$\Phi = LI,$$

где L — коэффициент пропорциональности. Он называется индуктивностью. Определим размерность индуктивности:

$$[L] = \left[\frac{\Phi}{I}\right] = \frac{в \cdot сек}{а} = ом \cdot сек,$$

ом · сек иначе называется генри (*гн*).

1 генри = 10^3 миллигенри (*мгн*) = 10^6 микрогенри (*мкгн*).

Индуктивность, кроме генри, измеряют в сантиметрах:

$$1 \text{ генри} = 10^9 \text{ } см.$$

Так, например, 1 *км* линии телеграфа обладает индуктивностью 0,002 *гн*. Индуктивность обмоток больших электромагнитов достигает нескольких сотен генри.

Если ток в контуре изменился на Δi, то магнитный поток изменится на величину $\Delta\Phi$:

$$\Delta\Phi = L\Delta i.$$

Э. д. с. самоиндукции, которая появится в контуре, будет равна:

$$e_L = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

При равномерном изменении тока по времени выражение $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ будет постоянным и его можно заменить выражением $\frac{I}{t}$. Тогда абсолютная величина э. д. с. самоиндукции, возникающая в контуре, может быть найдена так:

$$E_L = L\frac{I}{t}.$$

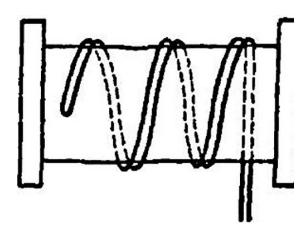
На основании последней формулы можно дать определение единицы индуктивности — генри:

$$1\ в = 1\ гн \cdot \frac{1\ а}{1\ сек}.$$

Проводник обладает индуктивностью 1 *гн*, если при равномерном изменении тока на 1 *а* в 1 сек. в нем индуктируется э. д. с. самоиндукции 1 *в*.

Как мы убедились выше, э. д. с. самоиндукции возникает в цепи постоянного тока только в моменты его включения, выключения и при всяком его изменении. Если же величина тока в цепи неизменна, то магнитный поток проводника постоянен и э. д. с. самоиндукции возникнуть не может (так как $\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0$). В моменты изменения тока в цепи э. д. с. самоиндукции мешает изменениям тока, т. е. оказывает ему своеобразное сопротивление.

Часто на практике встречаются случаи, когда нужно изготовить катушку, не обладающую индуктивностью (добавочные сопротивления к электроизмерительным приборам, сопротивления штепсельных реостатов и т. п.). В этом случае применяют бифилярную обмотку катушки (фиг. 122).



Фиг. 122. Бифилярная обмотка катушки

Как нетрудно видеть из чертежа, в соседних проводниках токи проходят в противоположных направлениях. Следовательно, магнитные поля соседних проводников взаимно уничтожаются. Общий магнитный поток и индуктивность катушки будут равны нулю. Для еще более полного уяснения понятия индуктивности приведем пример из области механики.

Как известно из физики, по второму закону Ньютона ускорение, полученное телом под действием силы, пропорционально самой силе и обратно пропорционально массе тела:

$$a = \frac{F}{m}$$

или

$$F = ma = m\frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Сравним последнюю формулу с формулой э. д. с. самоиндукции, взяв абсолютное значение э. д. с.:

$$e_L = L\frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

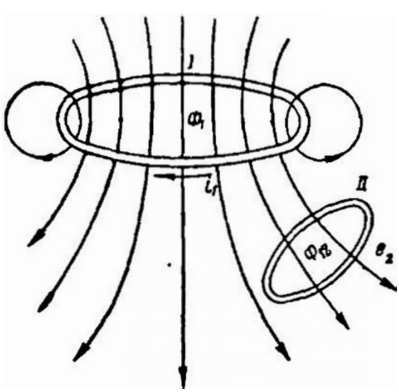
Если в этих формулах изменения скорости во времени $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ уподобить изменению тока во времени $\frac{\Delta i}{\Delta t}$, механическую силу — электродвижущей силе самоиндукции, то масса тела будет соответствовать индуктивности цепи.

При равномерном прямолинейном движении $a = 0$, поэтому $F = 0$, т. е. если на тело не действуют силы, его движение будет прямолинейным и равномерным (первый закон Ньютона).

В цепях постоянного тока величина тока не меняется $\left(\frac{\Delta i}{\Delta t} = 0\right)$ и поэтому $e_L = 0$.

§ 76. Взаимоиндукция

В § 70 было указано, что взаимоиндукцией называется влияние изменяющегося магнитного поля одного проводника на другой проводник, в результате чего во втором проводнике возникает индуктированная э. д. с. Пусть мы имеем два проводника *I* и *II* (фиг. 123) или две катушки, или два контура. Ток в первом проводнике i_1 создается источником напряжения (на чертеже не показанном). Ток i_1 образует магнитный поток Φ_1, одна часть которого Φ_{12} пересекает второй проводник, а другая часть Φ_{11} замыкается помимо второго проводника:



Фиг. 123. Явление взаимоиндукции

$$\Phi_1 = \Phi_{12} + \Phi_{11}.$$

Если вместо проводников мы возьмем две катушки с числом витков w_1 и w_2, то потокосцепление второго контура будет:

$$\psi_{12} = w_2\Phi_{12}.$$

Так как поток Φ_{12} пропорционален току i_1, то зависимость между потокосцеплением ψ_{12} и током i_1 будет:

$$\psi_{12} = M_{12} i_1,$$

откуда

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_1} = \frac{w_2 \Phi_{12}}{i_1},$$

где M_{12} — коэффициент пропорциональности, называемый взаимной индуктивностью двух катушек (или контуров).

Размерность взаимной индуктивности определяется так:

$$[M] = \left[\frac{w\Phi}{i}\right] = \frac{в \cdot сек}{а} = ом \cdot сек \text{ или генри.}$$

Таким образом, взаимная индуктивность M измеряется в тех же единицах, что и индуктивность L.

Взаимная индуктивность зависит от числа витков катушек, их размера, взаимного расположения катушек и магнитной проницаемости среды, в которой находятся катушки.

Если пропустить ток i_2 по второму проводнику, то по аналогии можно написать:

$$\psi_{21} = w_1 \Phi_{21},$$

и

$$\psi_{21} = M_{21} i_2,$$

откуда

$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_2} = \frac{w_1 \Phi_{21}}{i_2}.$$

Пользуясь законом Ома для магнитной цепи, можно доказать, что

$$\Phi_{12} = \frac{i_1 w_1}{R_м} \text{ и } \Phi_{21} = \frac{i_2 w_2}{R_м},$$

где $R_м$ — магнитное сопротивление замкнутого контура, по которому проходят магнитные потоки Φ_{12} и Φ_{21}.

В выражения

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_1} \text{ и } M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_2}$$

подставим значения ψ_{12}, ψ_{21}, Φ_{12}, Φ_{21}.

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_1} = \frac{w_2 \Phi_{12}}{i_1} = \frac{w_2 i_1 w_1}{i_1 R_м} = \frac{w_1 w_2}{R_м},$$

$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_2} = \frac{w_1 \Phi_{21}}{i_2} = \frac{w_1 i_2 w_2}{i_2 R_м} = \frac{w_1 w_2}{R_м}.$$

Таким образом, $M_{12} = M_{21} = M$.

Следовательно, взаимная индуктивность двух индуктивно или магнитно связанных цепей не зависит от того, какой цепью будет создаваться магнитный поток.

При изменении тока i_1 магнитные потоки Φ_{11} и Φ_{12} будут изменяться и во втором контуре; возникнет индуктированная э. д. с., величина которой будет равна:

$$e_{M_2} = -\frac{\Delta\psi_{12}}{\Delta t} = -w_2\frac{\Delta\Phi_{12}}{\Delta t} = -M\frac{\Delta i_1}{\Delta t};$$

аналогично:

$$e_{M_1} = -\frac{\Delta\psi_{21}}{\Delta t} = -w_1\frac{\Delta\Phi_{21}}{\Delta t} = -M\frac{\Delta i_2}{\Delta t}.$$

Эти э. д. с. называются э. д. с. взаимной индукции. Если первый контур обладает сопротивлением r_1 и индуктивностью L_1, то напряжение U_1, приложенное к этому контуру, должно уравновесить э. д. с. самоиндукции и взаимоиндукции, а также падение напряжения в сопротивлении r_1 контура:

$$U_1 = L_1\frac{\Delta i_1}{\Delta t} + M\frac{\Delta i_2}{\Delta t} + i_1 r_1.$$

Для второго контура:

$$U_2 = L_2\frac{\Delta i_2}{\Delta t} + M\frac{\Delta i_1}{\Delta t} + i_2 r_2.$$

Между индуктивностями L_1 и L_2 контуров и взаимной индуктивностью M существует следующая зависимость:

$$M = \sqrt{L_1 L_2}.$$

Однако эта формула верна, когда весь поток, создаваемый первым контуром, сцепляется с витками второго контура. На практике M меньше $\sqrt{L_1 L_2}$, т. е.

$$M = k\sqrt{L_1 L_2};\ k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

Величина k меньше единицы и называется **коэффициентом связи катушек**. Этот коэффициент равнялся бы единице в том случае, если бы $\Phi_{12} = \Phi_1$ и $\Phi_{21} = \Phi_2$.

Электромагнитная связь между двумя контурами может быть изменена, если сближать контуры или удалять их один от другого, а также если менять взаимное расположение контуров.

В технике применяют приборы, работающие по принципу взаимной индукции и служащие для изменения индуктивности цепи. Такие приборы называются **вариометрами**. Они состоят из двух последовательно соединенных катушек, одна из которых может вращаться внутри другой.

Пусть обе катушки расположены так, чтобы оси их были па-

раллельны одна другой и магнитные поля катушек направлены одинаково (согласное включение). В этом случае:

$$U = i(r_1 + r_2) + L_1\frac{\Delta i}{\Delta t} + L_2\frac{\Delta i}{\Delta t} + 2M\frac{\Delta i}{\Delta t} =$$

$$= i(r_1 + r_2) + \frac{\Delta i}{\Delta t}(L_1 + L_2 + 2M) = ir + L'\frac{\Delta i}{\Delta t},$$

где индуктивность системы

$$L' = L_1 + L_2 + 2M.$$

Если повернуть внутреннюю катушку на 180°, то в этом случае магнитные потоки будут направлены навстречу один другому (встречное включение).

В этом случае:

$$U = i(r_1 + r_2) + L_1\frac{\Delta i}{\Delta t} + L_2\frac{\Delta i}{\Delta t} - 2M\frac{\Delta i}{\Delta t} = ir + L''\frac{\Delta i}{\Delta t},$$

где

$$L'' = L_1 + L_2 - 2M.$$

Вращая внутреннюю катушку между первым и вторым положениями, мы можем менять индуктивность системы в пределах от L' до L''.

По принципу взаимной индукции работают трансформаторы, нашедшие весьма широкое применение в технике.

Бывает, что взаимная индукция нежелательна: две линии связи (телефон) оказывают взаимное влияние, мешая работе одна другой. Линии сильного тока, расположенные параллельно и вблизи линии связи, индуктируют в последней токи, вызывающие шум и треск, мешающие телефонным переговорам.

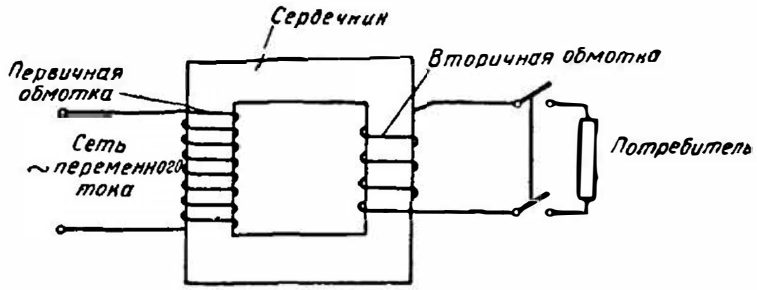
§ 77. Принцип действия трансформатора

Трансформатором называется аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения, но той же частоты (фиг. 124)

Устройство трансформатора следующее. На сердечник из мягкой стали намотаны две обмотки. Обмотка, к которой подводится напряжение, называется первичной. Ток, проходя по первичной обмотке, создает магнитное поле, индукционные линии которого замыкаются по сердечнику. Обмотка, в которой будет наводиться э. д. с., используемая далее во внешней цепи, называется вторичной обмоткой.

Если первичную обмотку трансформатора питать переменным током, т. е. током, изменяющимся с определенной частотой по величине и направлению, то в замкнутой вторичной обмотке

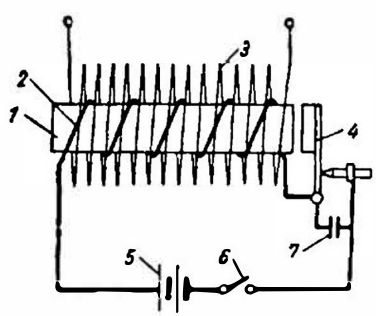
также будет протекать переменный ток и включенные в нее электрические лампы будут гореть ровно, не мигая. Отсюда видно, что работа трансформатора основана на использовании явления взаимоиндукции.



Фиг. 124. Схема устройства трансформатора

§ 78. Индукционная катушка

Индукционная катушка (фиг. 125) представляет собой частный случай трансформатора. Она состоит из сердечника *1* (набранного из нарезанных кусков стальной проволоки), на который намотано несколько витков толстой изолированной проволоки 2. Эти витки являются первичной обмоткой индукционной катушки. Поверх первичной обмотки наматывается другая обмотка *3* из тонкой изолированной проволоки с большим числом витков (от 16 000 до 1 000 000 и более). Это — вторичная обмотка индукционной катушки. Первичная обмотка через механический прерыватель *4* присоединяется к источнику постоянного напряжения *5* (батарее элементов, аккумуляторов и т. д.)



Фиг. 125. Схема устройства индукционной катушки

При замыкании выключателя *6* ток батареи проходит по первичной обмотке катушки и намагничивает ее сердечник. Намагнитившийся сердечник притягивает к себе якорек прерывателя, чем разрывается цепь первичной обмотки. В следующее мгновение размагниченный сердечник отпускает якорек прерывателя. Последний под действием пружины возвращается на прежнее

место, замыкает цепь первичной обмотки, и далее процесс повторяется вновь.

В результате непрерывных замыканий и размыканий цепи в первичной обмотке катушки протекает прерывистый ток. Изменяющееся магнитное поле первичной обмотки, пересекая витки вторичной обмотки, индуктирует в ней э. д. с. При замыкании первичной цепи э. д. с. во вторичной обмотке имеет одно направление, при размыкании — другое. Большое число витков дает возможность получать на концах вторичной обмотки напряжение в несколько тысяч, а иногда и сотни тысяч вольт. Слой воздуха между выводами вторичной обмотки пробивается и проскакивает искра, длина которой в больших индукционных катушках достигает 1 *м*.

Для получения большой э. д. с. во вторичной обмотке необходимо, чтобы ток в первичной цепи изменялся как можно быстрее. Однако искра в механическом прерывателе, появляющаяся при размыкании его контактов, не дает возможности току прекращаться сразу. Для быстрейшего исчезновения искры параллельно месту разрыва включают конденсатор 7.

Первичную обмотку индукционной катушки можно питать также переменным током. Тогда надобность в прерывателе отпадает.

При помощи индукционной катушки было сделано много важнейших физических открытий. Индукционные катушки широко применяются для зажигания рабочей смеси в автомобильных и авиационных двигателях и т. д.

Задачи для самостоятельного решения

1. В равномерном магнитном поле, индукция которого равна 6000 *гс*, перемещается проводник под углом 30° к направлению поля. Длина проводника 50 *см*. Скорость движения его 2,5 *м/сек*. Определить величину индуктированной э. д. с.

2. Магнитный поток $0{,}6 \cdot 10^8$ *мкс*, пронизывающий катушку, состоящую из 200 витков, уменьшается до нуля за 0,05 сек. Определить величину э. д. с., индуктированной в катушке.

3. В катушке за 0,01 сек. ток равномерно изменился на 200 *а*. Определить величину э. д. с. самоиндукции, если индуктивность катушки 0,05 *гн*.

4. Определить индуктивность катушки, состоящей из 100 витков, если при равномерном изменении тока на 20 *а* магнитный поток изменился за то же время на 0,6 *вб*.

Контрольные вопросы

1. Что называется электромагнитной индукцией?
2. В каких случаях возникает индуктированная э. д. с.?
3. От чего зависит направление индуктированной э. д. с.?
4. Как определить направление индуктированной э. д. с. в проводнике?
5. От чего зависит величина индуктированной э. д. с. в проводнике?

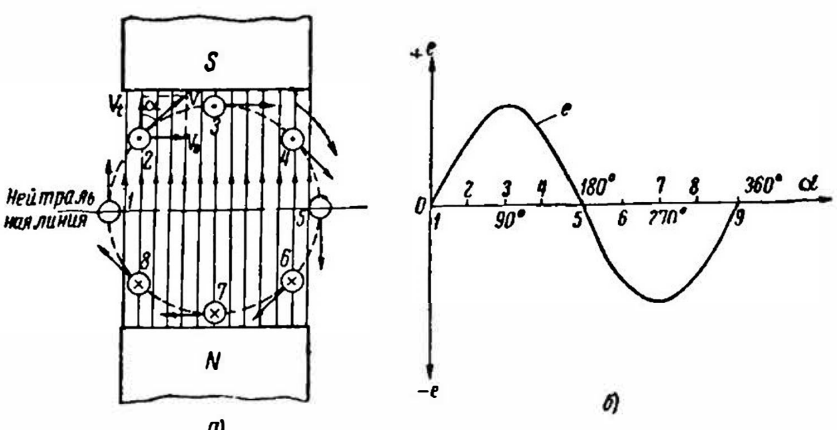
6. Объясните принцип действия генератора постоянного тока.
7. Как читается правило Ленца и какими опытами оно подтверждается?
8. Что такое взаимоиндукция?
9. Объясните принцип действия трансформатора.
10. Что такое индукционная катушка?
11. Что такое вихревые токи и какие меры принимают для их уменьшения?
12. Что называется самоиндукцией?
13. Как проявляет себя самоиндукция в цепях постоянного тока?

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ОДНОФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

§ 79. Получение переменного тока

Пусть имеется однородное магнитное поле, образованное между полюсами *NS* электромагнита (фиг. 126, *а*). Внутри поля под действием посторонней силы вращается по окружности в сторону движения часовой стрелки металлический прямолинейный проводник. Как известно, пересечение проводником магнитных линий приведет к появлению в проводнике индуктирован-



Фиг. 126. Получение переменного тока:
а — вращение проводника в однородном магнитном поле. *б* — график изменения переменного тока

ной э. д. с. Величина этой э. д. с., как было указано выше (§ 71), зависит от величины магнитной индукции B, активной длины проводника l, скорости пересечения проводником магнитных линий v и синуса угла α между направлением движения проводника и направлением магнитного поля.

$$e = Blv \sin \alpha.$$

Разложим окружную скорость v на две составляющие — нормальную и тангенциальную по отношению к направлению магнитной индукции B, как было показано в § 71. Нормальная составляющая скорости v_n обусловливает наводимую э. д. с. индукции и равна:

$$v_n = v \sin \alpha;$$

Тангенциальная составляющая скорости v_t не принимает участия в создании индуктированной э. д. с. и равна:

$$v_t = v \cos \alpha;$$

при $\alpha = 90°$ нормальная скорость

$$v_n = v \sin \alpha = v \sin 90° = v,$$

т. е. в этом случае нормальная составляющая скорости имеет максимальное значение. Такое же значение имеет в этот момент величина индуктированной э. д. с. в проводнике:

$$e = Blv = E_m,$$

откуда общее выражение для э. д. с. в проводнике будет:

$$e = E_m \sin \alpha \text{ или } e = \sin \alpha.$$

При движении проводник будет занимать различные положения. На чертеже положения проводника даны через каждые 45° угла поворота. Рассматривая отдельные положения проводника, мы видим, что угол пересечения α меняется и, кроме того, при переходе проводника через нейтральную линию направление индуктированной э. д. с., определяемое по правилу правой руки, также меняется. Для наглядности составим таблицу зависимости величины и направления э. д. с. (пропорциональной $\sin \alpha$) от положения проводника и угла между векторами индукции и скорости вращения проводника (табл. 16).

Таблица 16

Зависимость величины и направления э. д. с. от положения проводника

Положение проводника	Угол α между векторами индукции B и скорости v	$\sin \alpha$	Направление э. д. с. в проводнике
1	0	0	—
2	45	0,707	К нам
3	90	1	• •
4	135	0,707	• •
5	180	0	—
6	225	—0,707	От нас
7	270	—1	• •
8	315	—0,707	• •
9 или 1	360	0	—

Из таблицы видно, что за один полный оборот проводника э. д. с. в нем сначала увеличивается от нуля до максимального значения, затем уменьшается до нуля и, изменив свое направление, вновь увеличивается до максимального значения и вновь уменьшается до нуля. При дальнейшем движении проводника изменения э. д. с. будут повторяться.

Для наглядного представления о ходе изменения индуктированной э. д. с. в проводнике воспользуемся графическим методом. Проведем две взаимно перпенднкулярные оси (фиг. 126, *б*). На горизонтальной оси в одном масштабе отложим углы поворота проводника, а на вертикальной в другом масштабе — величину э. д. с., индуктированную в проводнике в каждый момент времени. Если э. д. с., индуктированную в проводнике при прохождении его под южным полюсом, считать положительной и откладывать от горизонтальной оси вверх, то э. д. с., индуктированную в проводнике при прохождении его под северным полюсом, следует считать отрицательной и откладывать от горизонтальной оси вниз. Проведя затем через концы отрезков, изображающих в масштабе величины э. д. с., непрерывную линию, получим кривую, называемую синусоидой. При помощи кривой мы можем легко определить величину э. д. с. в любой момент времени. Для этого на горизонтальной оси откладываем интересующий нас угол поворота проводника от начального положения. Затем от этой точки восстанавливаем перпендикуляр. Отрезок, заключенный между точками пересечения перпендикуляра с кривой и горизонтальной осью, будет в масштабе выражать величину индуктированной э. д. с. в проводнике в этот момент времени.

В нашем примере проводник вращается в однородном магнитном поле. В проводнике индуктировалась э. д. с., изменяющаяся по закону синуса. Такая э. д. с. называется синусоидальной.

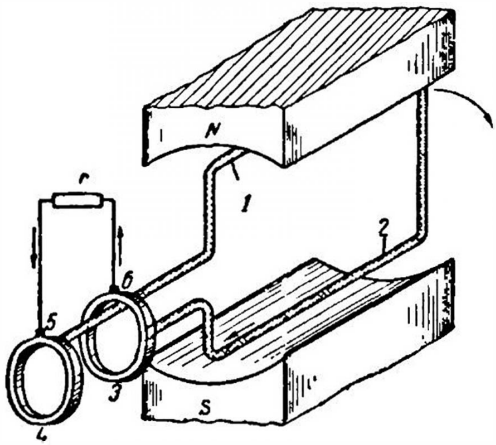
В дальнейшем мы увидим, что электротехника предпочитает пользоваться переменными величинами, изменяющимися по синусоидальному закону.

Устройство, показанное на фиг. 127, позволяет снимать и отводить во внешнюю цепь переменную э. д. с. Согнутый рамкой проводник вращается в магнитном поле под действием посторонней силы. Концы рамки присоединены к двум медным кольцам *3* и *4*, на которых наложены две угольные щетки *5* и *6*. Во внешней цепи будет протекать изменяющийся по величине и направлению ток. Такой ток называется переменным в отличие от постоянного, который дают гальванические элементы и аккумуляторы. Переменный ток на электрических схемах принято обозначать условным знаком $\sim$.

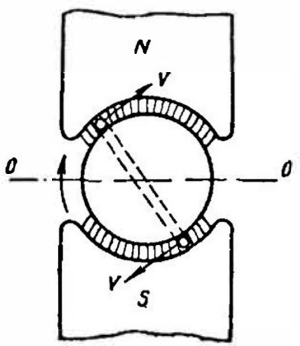
В создании индуктированной э. д. с. будут участвовать не все стороны рамки, а лишь те, которые пересекают магнитные ли-

нин. Эти стороны называются активными сторонами (на фиг. 127 они обозначены цифрами *1* и *2*).

Конструкция генератора переменного тока, показанная на фиг. 127, не может быть практически использована. Недостатком ее является трудность создания однородного магнитного поля и большое магнитное сопротивление магнитному потоку, который значительный путь проходит по воздуху.



Фиг. 127. Устройство для отвода переменного тока от ротора генератора



Фиг. 128. Магнитный поток машины при наличии стального барабана

В конструкциях современных электрических машин между полюсами электромагнита помещают стальной барабан, в пазы которого укладывают проводники обмотки. Такая конструкция машины представлена на фиг. 128. Магнитным линиям в этом случае приходится проходить по воздуху короткий путь между сталью полюсов и барабана. Можно доказать, что магнитные линии, проходя воздушный промежуток, будут входить в барабан в радиальном направлении и в таком же направлении будут выходить из него, чтобы попасть в другой полюс. В этом случае направление окружной скорости в каждый момент перпендикулярно направлению магнитных линий, т. е. скорость будет все время нормальной скоростью ($v = v_n$).

Стремление получить синусоидальную э. д. с. заставляет конструктора машины придать такую форму полюсным наконечникам, при которой магнитная индукция в воздушном зазоре изменялась бы по закону синуса:

$$B = B_m \sin \alpha,$$

где B_m — максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре при $\alpha = 90°$, т. е.

$$B = B_m \sin \alpha = B_m \sin 90° = B_m.$$

В этот момент э. д. с., индуктированная в проводнике, также имеет максимальное значение:

$$e = B_m l v = E_m,$$

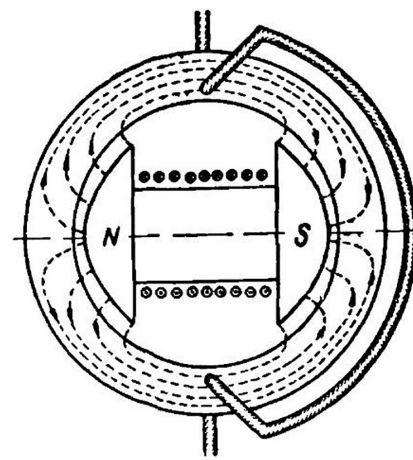
откуда общее выражение для э. д. с. в проводнике будет:

$$e = E_m \sin \alpha$$

или

$$e = \sin \alpha.$$

Для получения индуктированной э. д. с. в генераторах безразлично, будет ли движущийся проводник пересекать неподвижное магнитное поле или движущееся поле будет пересекать неподвижный проводник. В рассмотренных конструкциях генераторов переменного тока обмотка, где индуктировалась переменная э. д. с., размещалась на вращающейся части машины — роторе, а полюса располагались на неподвижной части машины — статоре. Однако для того чтобы поставить обмотку переменного тока в более благоприятные условия, ее чаще располагают на статоре, а обмотку возбуждения полюсов помещают на роторе. Генератор такой конструкции представлен на фиг. 129.



Фиг. 129. Двухполюсный генератор переменного тока

Постоянный ток, необходимый для обмотки возбуждения, подается от специального генератора-возбудителя постоянного тока, сидящего на одном валу с генератором переменного тока, или от выпрямительного устройства.

§ 80. Основные понятия и определения, относящиеся к переменным токам

Рассматривая процесс получения переменного тока, мы убедились, что переменная э. д. с. и переменный ток периодически меняют свои направления и величину. Значение переменной величины (тока, напряжения и э. д. с.) в рассматриваемый момент времени называется мгновенным значением и обозначается малой буквой (i — ток, u — напряжение, e — э. д. с.).

Наибольшее из мгновенных значений переменной величины называется ее максимальным, или амплитудным, зна-

чением и обозначается большой буквой с индексом m, например I_m, E_m, U_m. Промежуток времени, по истечении которого изменения переменной величины (э. д. с., напряжения или тока) повторяются, называется п е р и о д о м и обозначается буквой T. Период измеряется в секундах. Число периодов в единицу времени (в секунду) называется ч а с т о т о й переменного тока и обозначается буквой f. Единицей частоты служит герц (*гц; Hz*). 1 герц равен 1 периоду в секунду.

В технике применяют переменные токи различной частоты. Стандартной частотой тока в СССР считается частота 50 *гц*. Для высокочастотных электрических печей применяют переменные токи частотой несколько тысяч и десятков тысяч герц (1000, 2500 и 8000 *гц* от машинных генераторов и 150—250 *кгц* от ламповых генераторов). Для диэлектрического нагрева пластмасс, древесины, стекла, пищевых продуктов и других полупроводниковых и диэлектрических материалов применяют высокочастотные установки частотой 20—25 *мггц*.

На линиях телефонной связи употребляют токи частотой порядка сотен и тысяч герц. Токи частотой несколько миллионов и миллиардов герц применяют в радиотехнике.

Частота переменного тока измеряется приборами — частотомерами.

Между периодом и частотой существует следующая зависимость:

$$T = \frac{1}{f}; \quad f = \frac{1}{T}.$$

Пример 1. Определить период тока, если частота его 50 *гц*.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0{,}02 \text{ сек}.$$

Пример 2. Найти частоту тока, если период равен $5 \cdot 10^{-8}$ сек.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{}{5 \cdot 10^{-8}} = 20 \cdot 10^{6} \text{ гц} = 20 \cdot 10^{3} \text{ кгц (килогерц)} = 20 \text{ мгц (мегагерц)}.$$

§ 81. Синусоидальные переменные величины

Практика остановила свой выбор на синусоидальных колебаниях переменных электрических величин. В дальнейшем, говоря о токе, э. д. с., напряжении и магнитном потоке, мы будем считать их изменяющимися по закону синуса.

Пусть мы имеем вектор OA (фиг. 130), выражающий в масштабе какую-либо переменную синусоидальную величину, например ток. Будем вращать с постоянной скоростью вектор вокруг точки O против часовой стрелки. Конец вектора будет описывать окружность, а угол, на который поворачивается вектор, будет меняться с течением времени.

Угловая скорость или угловая частота ω (омега) вращения равна углу поворота вектора в единицу времени:

$$\omega = \frac{\alpha}{t},$$

откуда

$$\alpha = \omega t.$$

Часто вместо градуса пользуются другой единицей измерения угла — радианом. Радианом называется угол, дуга которого равна радиусу. Если длина окружности $C = 2\pi R$, то она содержит $\frac{2\pi R}{R} = 2\pi$ радиан.

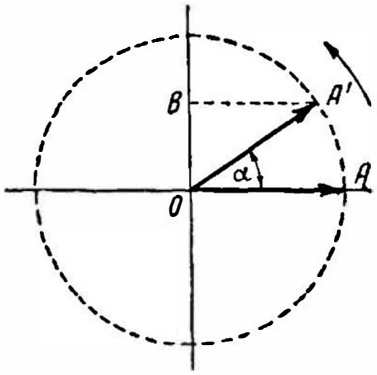
За один оборот радиус-вектор OA будет иметь один период вращения продолжительностью T секунд.

Угловая частота в этом случае выразится:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} \frac{\text{рад.}}{\text{сек.}}.$$

Так как $\frac{1}{T} = f$, то

$$\omega = 2\pi f \frac{\text{рад.}}{\text{сек.}}.$$



Фиг. 130. Вращение вектора вокруг оси

Угол поворота радиуса-вектора α от начального положения будет равен:

$$\alpha = \omega t = 2\pi f t.$$

Угол α называется фазным углом или фазой.

Проекция вектора OA на вертикальный диаметр равна произведению величины вектора на синус фазного угла, т. е.

$$OB = OA \sin \alpha.$$

Таким образом, проекция вращающегося вектора OA на вертикальный диаметр изменяется по закону синуса. Если длина вектора будет A_m, то мгновенное значение величины проекции a равно:

$$a = A_m \sin \alpha = A_m \sin \omega t;$$

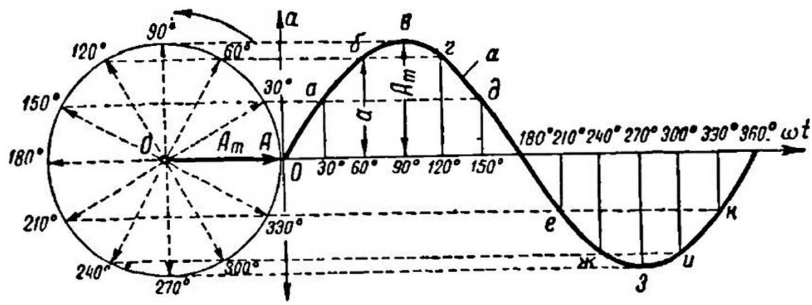
при $\alpha = 0°$ величина $a = A_m \sin 0° = 0$;

при $\alpha = 90°$ величина $a = A_m \sin 90° = A_m$.

В последнем случае мгновенное значение величины проекции равно ее амплитудному или максимальному значению.

Задаваясь величиной фазного угла и проектируя вектор A_m на вертикальный диаметр, будем получать мгновенное значение синусоидальной величины.

Проведем горизонтальную ось, на которой отложим фазные углы, проходимые вектором при его вращении (фиг. 131). Откладываем затем вертикальные отрезки, равные мгновенным значениям величины в местах окончания горизонтальных отрезков, соответствующих фазным углам. Соединяя концы вертикальных отрезков плавной кривой, получим знакомую нам кривую — синусоиду.



Фиг. 131. Получение синусоиды путем вращения вектора

Синусоидальная кривая получена в результате вращения вектора, который в масштабе выражал амплитудное (максимальное) значение переменной синусоидальной величины. Способ изображения синусоидально меняющихся во времени величин с помощью векторов определенной длины и определенным образом расположенных между собой называется **векторной диаграммой**.

Та же зависимость может быть выражена графически в виде синусоидальных кривых.

Таким образом, переменную синусоидальную величину можно представить тремя способами: уравнением, векторной диаграммой и графиком.

Если радиус-вектор в начальный момент времени ($t=0$) составляет некоторый угол ψ с горизонтальной осью, то в этом случае мгновенное значение переменной величины будет:

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi).$$

Угол ψ (пси) называется начальным **фазным углом** или **начальной фазой**.

Векторная диаграмма и график для этого случая даны на фиг. 132.

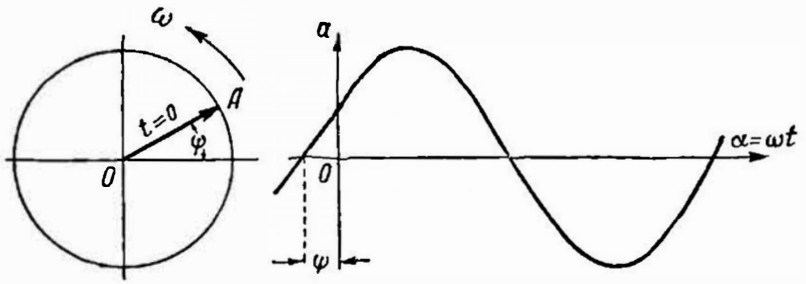
Мы не внесем ничего нового, если будем вращать два вектора, совпадающие по направлению. В определенный момент времени оба вектора будут повернуты на один и тот же фазный угол. Поэтому как сами векторы, так и переменные величины, которые они выражают, называют совпадающими по фазе. Век-

торная диаграмма и график двух величин, совпадающих по фазе, даны на фиг. 133.

Уравнения для таких величин запишутся так:

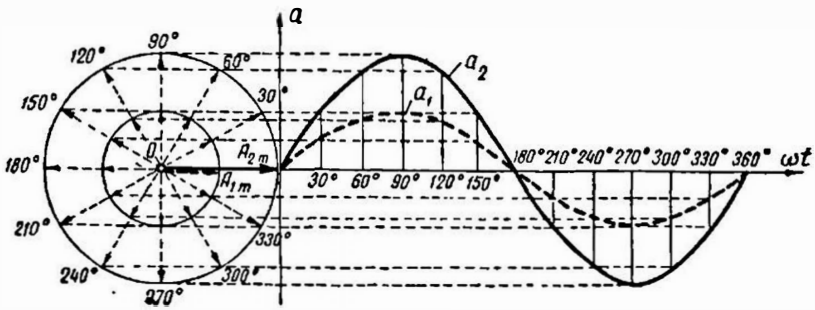
$$a_1 = A_{1m} \sin \omega t.$$

$$a_2 = A_{2m} \sin \omega t;$$



Фиг. 132. Построение синусоиды при наличии начальной фазы

Если векторы сдвинуть один относительно другого на определенный угол φ и вращать вокруг точки O, то мы получим две синусоидальные кривые, сдвинутые, как говорят, по фазе между



Фиг. 133. Построение двух синусоид путем вращения двух совпадающих векторов

собой на тот же угол φ. На фиг. 134 показано построение двух синусоид, сдвинутых по фазе на угол φ, равный 90°. В этом случае о кривой a_1 говорят, что она опережает кривую a_2 по фазе на 90°, или, наоборот, кривая a_2 отстает по фазе от кривой a_1 на 90°.

При изучении явлений в цепях переменного тока нам придется часто заниматься сложением и вычитанием синусоидальных величин (токов, напряжений и др.).

Рассмотрим сложение двух синусоидальных величин, заданных уравнениями:

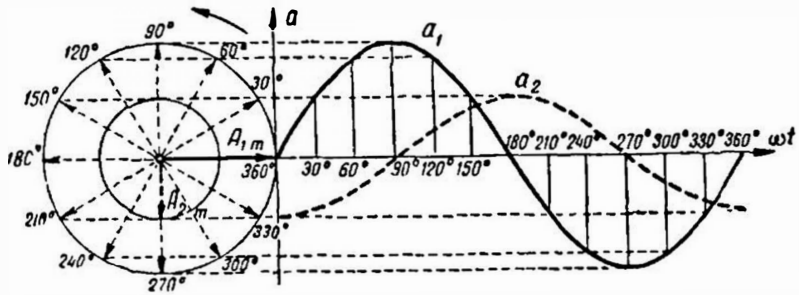
$$a_1 = A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1);$$
$$a_2 = A_{2m} \sin(\omega t + \psi_2).$$

Их сумма будет иметь величину:

$$a = a_1 + a_2 = A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + A_{2m} \sin(\omega t + \psi_2),$$

Произведя необходимые математические преобразования, получим окончательно:

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi).$$



Фиг. 134. Построение двух синусоид, сдвинутых на 90°, путем вращения двух векторов, расположенных под углом 90°

Отсюда видно, что суммой двух синусоид одинакового периода является также синусоида с амплитудой A_m и начальной фазой ψ.

Сложение синусоидальных величин проще представить на векторной диаграмме, показанной на фиг. 135 слева. Из диаграммы следует:

$$a_1 = A_{1m} \cos \psi_1;$$
$$a_2 = A_{2m} \cos \psi_2;$$
$$a = a_1 + a_2;$$
$$b_1 = A_{1m} \cdot \sin \psi_1;$$
$$b_2 = A_{2m} \cdot \sin \psi_2;$$
$$b = b_1 + b_2.$$

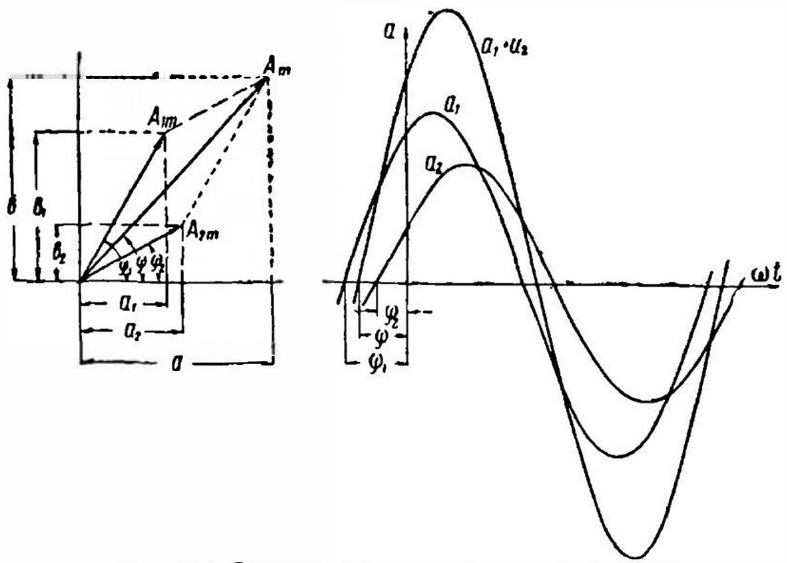
Величина результирующего вектора A_m, равная геометрической сумме векторов A_{1m} и A_{2m}, составляет:

$$A = \sqrt{a^2 + b^2};$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{b}{a}.$$

На фиг. 135 справа дано графическое сложение двух синусоидальных величин. Любое мгновенное значение результирующей синусоиды равно сумме мгновенных значений слагаемых синусоид для каждого момента времени.

Полученные выводы можно применить для сложения трех и больше синусоидальных величин.

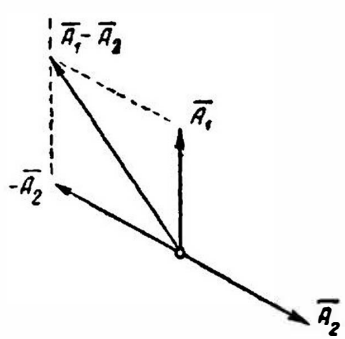


Фиг. 135. Сложение двух синусоидальных величин

Для того чтобы отличить действия с векторами от действий со скалярными величинами, мы в дальнейшем будем ставить черту над буквенным обозначением вектора. Например, сложение двух векторов A_1 и A_2 будем записывать так:

$$\overline{A} = \overline{A}_1 + \overline{A}_2.$$

Рассмотрим теперь, как производится вычитание векторных величин. Пусть векторы A_1 и A_2 изображают какие-то синусоидальные величины и нам нужно из вектора A_1 вычесть вектор A_2 (фиг. 136). Вычитание векторов всегда можно заменить сложением уменьшаемого вектора с вектором, равным и противоположным вычитаемому вектору, т. е.



Фиг. 136. Вычитание векторов

$$\overline{A}_1 - \overline{A}_2 = \overline{A}_1 + (-\overline{A}_2).$$

§ 82. Зависимость частоты генератора переменного тока от числа пар полюсов и скорости вращения ротора

При рассмотрении вопроса о получении переменного тока указывают, что за один оборот ротора индуктированная в проводниках обмотки генератора э. д. с. имела один период. Если ротор генератора делает, например, 5 *об/сек*, то э. д. с. будет иметь 5 *пер/сек* или частота тока генератора будет равна 5 *гц*. Следовательно, число оборотов в секунду ротора генератора численно равно частоте тока.

Частота тока f выражается следующим соотношением:

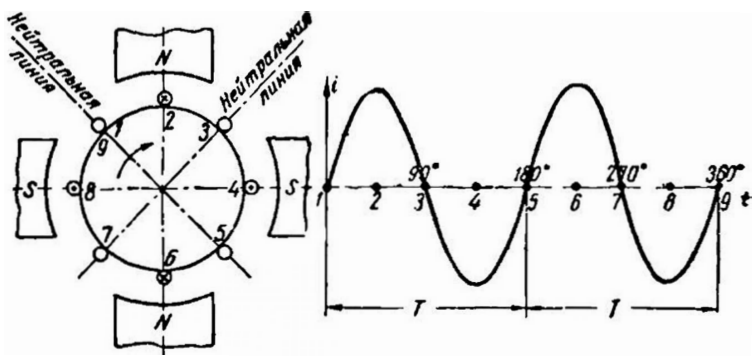
$$f=\frac{n}{60},$$

где n — число оборотов ротора в минуту.

Для получения от генератора стандартной частоты тока — 50 *гц* ротор должен делать 3000 *об/мин*, т. е.

$$f=\frac{n}{60}=\frac{3000}{60}=50\ гц.$$

Однако наши рассуждения были справедливы только для двухполюсного генератора, т. е. для машины с одной парой полюсов p.



Фиг. 137. Изменение переменного тока в проводнике ротора четырехполюсного генератора

Если машина четырехполюсная, т. е. число пар полюсов равно двум: $p=2$ (фиг. 137), то один полный период изменения тока будет иметь место за пол-оборота ротора (*1—5* положения проводника на чертеже). За второй полуоборот ротора ток будет иметь еще один период. Следовательно, за один оборот ротора четырехполюсной машины ток в проводнике имеет два периода. В шестиполюсной машине ($p=3$) ток в проводнике за один оборот ротора будет иметь три периода.

Таким образом, для машин, имеющих p пар полюсов, частота тока при $\frac{n}{60}$ *об/сек* будет в p раз больше, чем для двухполюсной машины, т. е.

$$f = \frac{pn}{60}.$$

Отсюда формула для определения скорости вращения ротора будет иметь следующий вид:

$$n = \frac{60f}{p}$$

Пример 3. Определить частоту переменного тока, получаемого от генератора с восемью полюсами ($p=4$), скорость вращения ротора которого $n = 750$ *об/мин*. Подставляя в формулу для определения частоты тока значение p и n, получим:

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{4 \cdot 750}{60} = 50 \text{ гц}.$$

Пример 4. Определить скорость вращения ротора двадцатиполюсного генератора ($p=10$), если частотомер показал частоту тока $f=25$ *гц*. Подставляя в формулу для определения числа оборотов ротора n значения p и f, получим:

$$n = \frac{f60}{p} = \frac{25 \cdot 60}{10} = 150 \text{ об/мин}.$$

Пример 5. Ротор генератора, приводимого в движение водяной турбиной, делает 75 *об/мин*. Определить число полюсов генератора, если частота его тока 50 *гц*:

$$p = \frac{f60}{n} = \frac{50 \cdot 60}{75} = 40 \text{ пар}.$$

Следовательно, генератор имеет 80 полюсов.

§ 83. Действующее значение переменного тока

Переменный синусоидальный ток в течение периода имеет различные мгновенные значения. Естественно поставить вопрос, какое же значение тока будет измеряться амперметром, включенным в цепь? Действия тока не определяются ни амплитудным, ни мгновенным значениями. Для оценки действия, производимого переменным током, мы сравним его действия с тепловым эффектом постоянного тока.

Мощность P постоянного тока I, проходящего через сопротивление r, будет

$$P = I^2 r.$$

Мощность переменного тока выразится как средний эффект мгновенной мощности $i^2 r$ за целый период или среднее значение от $(I_m \cdot \sin \omega t)^2 \cdot r$ за то же время.

Пусть среднее значение i^2 за период будет M. Приравнивая мощность постоянного тока и мощность при переменном токе, имеем:

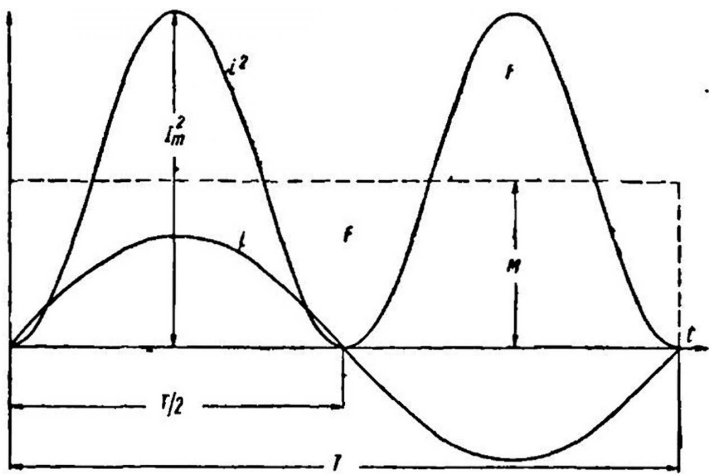
$$I^2 r = Mr,$$

откуда

$$I = \sqrt{M}.$$

Величина I называется действующим значением переменного тока.

Среднее значение i^2 при переменном токе определим следующим образом. Построим синусоидальную кривую изменения тока (фиг. 138). Возведя в квадрат каждое мгновенное значение тока, получим кривую зависимости i^2 от времени. Обе половины



Фиг. 138. Действующее значение переменного тока

этой кривой лежат выше горизонтальной оси, так как отрицательные значения тока $(-i)$ во второй половине периода, будучи возведены в квадрат, дают положительные величины. Построим прямоугольник с основанием T и площадью, равной площади, ограниченной кривой i^2 и горизонтальной осью. Высота прямоугольника M будет соответствовать среднему значению i^2 за период. Это значение за период, вычисленное при помощи высшей математики, будет равно $\frac{1}{2} I^2_m$.

Следовательно,

$$M = \frac{1}{2} I^2_m.$$

Так как действующее значение I переменного тока равно $\sqrt{M}$, то окончательно

$$I = \sqrt{M} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Аналогично зависимость между действующим и амплитудным значениями для напряжения U и E имеет вид:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; \qquad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Действующие значения переменных величин обозначаются прописными буквами без индексов (I, U, E).

На основании изложенного выше можно сказать, что действующее значение переменного тока равно такому постоянному току, который, проходя через то же сопротивление, что и переменный ток, за то же время выделяет такое же количество энергии.

Электроизмерительные приборы (амперметры, вольтметры), включенные в цепь переменного тока, показывают действующие значения тока или напряжения.

При построении векторных диаграмм удобнее откладывать не амплитудные, а действующие значения векторов. Для этого длины векторов уменьшают в $\sqrt{2}$ раз. От этого расположение векторов на диаграмме не изменяется.

§ 84. Среднее значение переменного тока

Среднее значение переменной синусоидальной величины за период равно нулю. Поэтому, когда говорят о среднем значении синусоидальной величины, имеют в виду среднее значение за полпериода. На фиг. 139 изображена кривая изменения переменного тока за полпериода.

Построим прямоугольник с основанием $T/2$ и площадью, равной площади, заключенной между кривой и горизонтальной осью. Высота прямоугольника будет представлять среднее значение тока за полпериода.

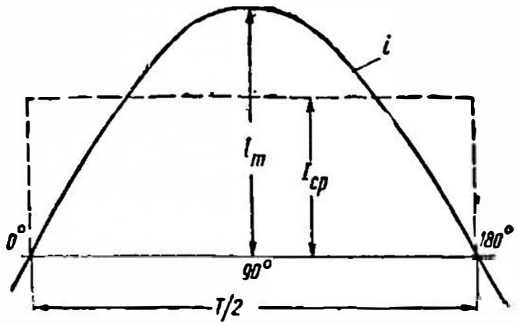
Высшая математика дает следующую зависимость между средним и амплитудным значениями переменного синусоидального тока:

$$I_{ср} = \frac{2}{\pi} I_m = 0{,}637\, I_m.$$

Такая же зависимость существует между средними и амплитудными значениями напряжения и э. д. с.

$$U_{ср} = 0{,}637\, U_m; \quad E_{ср} = 0{,}637\, E_m.$$

Отношение действующего значения переменной величины к ее среднему значению называется коэффициентом формы кривой и обозначается буквой $k_ф$.



Фиг. 139. Среднее значение переменного тока

Для синусоидальных величин этот коэффициент равен:

$$k_ф = \frac{I}{I_{ср}} = \frac{I_m \pi}{\sqrt{2} \cdot 2 I_m} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}11.$$

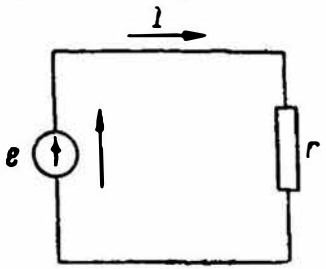
Отношение амплитудного значения переменной величины к ее действующему значению называется коэффициентом амплитуды и обозначается буквой $k_а$.

Для синусоидальных величин этот коэффициент

$$k_а = \frac{I_m}{I} = \sqrt{2} = 1{,}41.$$

§ 85. Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Рассмотрим цепь (фиг. 140), состоящую из сопротивления r. Влиянием индуктивности и емкости для простоты пренебрегаем.



Фиг. 140. Цепь, содержащая активное сопротивление

К зажимам цепи приложено синусоидальное напряжение

$$u = U_m \sin \omega t.$$

По закону Ома мгновенное значение тока будет равно:

$$i = \frac{u}{r} = \frac{U_m}{r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t,$$

где $I_m = \frac{U_m}{r}$

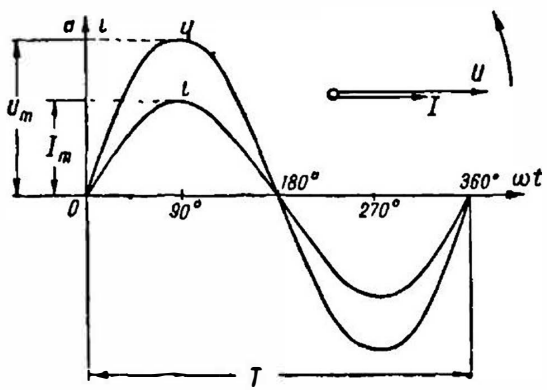
или, переходя к действующим значениям, получаем:

$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}r}$$

и

$$I = \frac{U}{r}.$$

Как следует из последнего выражения, вид закона Ома для цепи переменного тока, содержащей сопротивление, тот же, что для цепи постоянного тока. Кроме того, из закона Ома видна пропорциональность между мгновенным значением напряжения и мгновенным значением тока. Отсюда следует, что в цепи переменного тока, содержащей сопротивление r, напряжение и



Фиг. 141. Графики и векторная диаграмма для цепи переменного тока, содержащей активное сопротивление

ток совпадают по фазе. На фиг. 141 даны кривые напряжения и тока и векторная диаграмма для рассматриваемой цепи, причем длины векторов обозначают действующие значения напряжения и тока. Сопротивление проводников переменному току несколько больше их сопротивления постоянному току. Это объясняется поверхностным эффектом, сущность которого изложена в § 87. Поэтому сопротивление проводников переменному току называют активным. Обозначается оно также буквой r.

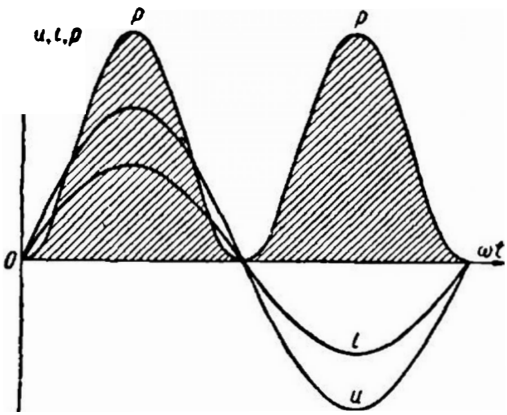
В цепи, представленной на фиг. 140, приложенное внешнее напряжение уравновешивается падением напряжения в сопротивлении r, которое называется активным падением напряжения и обозначается U_a:

$$U_a = Ir.$$

Мгновенное значение мощности в рассматриваемой цепи равно произведению мгновенных значений напряжения и тока:

$$p = ui.$$

На фиг. 142 дана кривая мгновенной мощности за один период. Из чертежа видно, что мощность не является постоянной величиной, она пульсирует с двойной частотой [1].



Фиг. 142. Кривая мгновенной мощности цепи с активным сопротивлением

Среднее за период значение мощности или просто средняя мощность обозначается буквой P и может быть определена по формуле, доказательство которой мы не приводим:

$$P = UI\cos\varphi,$$

где φ — угол сдвига фаз между напряжением и током.

Средняя мощность называется также активной мощностью. Данная формула активной мощности справедлива для любых цепей переменного тока.

Для цепи с активным сопротивлением напряжение и ток совпадают по фазе. Поэтому угол φ равен нулю, а $\cos\varphi = 1$. Для активной мощности получим:

$$P = UI$$

или

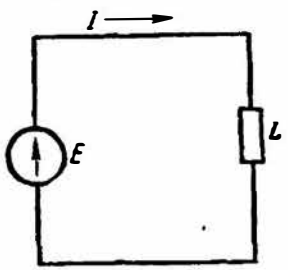
$$P = I^2 r,$$

т. е. формула мощности для цепи переменного тока с активным сопротивлением такая же, как формула мощности для цепи постоянного тока. Активным сопротивлением обладают все проводники. В цепи переменного тока практически только одним активным сопротивлением обладают нити ламп накаливания, спирали электронагревательных приборов и реостатов, дуговые лампы, специальные бифилярные обмотки и прямолинейные проводники небольшой длины.

[1] Пульсацией называется изменение численного значения величины при постоянстве ее знака.

§ 86. Цепь переменного тока с индуктивностью

Как мы видели выше, при включении, выключении и при всяком изменении тока в электрической цепи вследствие пересечения проводника своим же собственным магнитным полем в нем возникает индуктированная э. д. с. Эту э. д. с. мы называли э. д. с. самоиндукции. Э. д. с. самоиндукции имеет реактивный характер. Так, например, при увеличении тока в цепи э. д. с. самоиндукции будет направлена против э. д. с. источника напряжения, и поэтому ток в электрической цепи не может установиться сразу. И, наоборот, при уменьшении тока в цепи индуктируется э. д. с. самоиндукции такого направления, что, мешая току исчезать, она поддерживает этот убывающий ток.



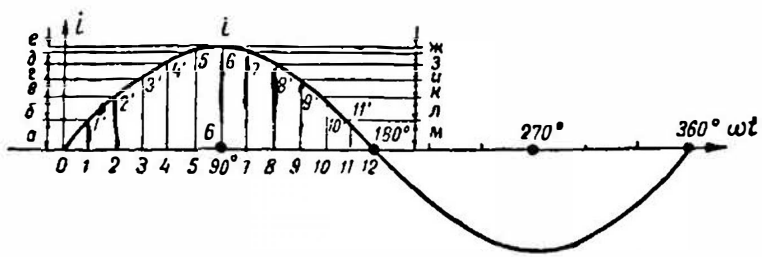
Фиг. 143. Цепь переменного тока, содержащая индуктивность

Как нам уже известно, э. д. с. самоиндукции зависит от скорости изменения тока в цепи и от индуктивности этой цепи (числа витков, наличия стальных сердечников).

$$e_L = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

В цепи переменного тока э. д. с. самоиндукции возникает непрерывно, так как ток в цепи непрерывно изменяется.

На фиг. 143 представлена схема цепи переменного тока, содержащей катушку с индуктивностью L без стального сердечни-



Фиг. 144. Определение скорости изменения переменного тока

ка. Для простоты будем считать сначала, что активное сопротивление катушки очень мало и им можно пренебречь.

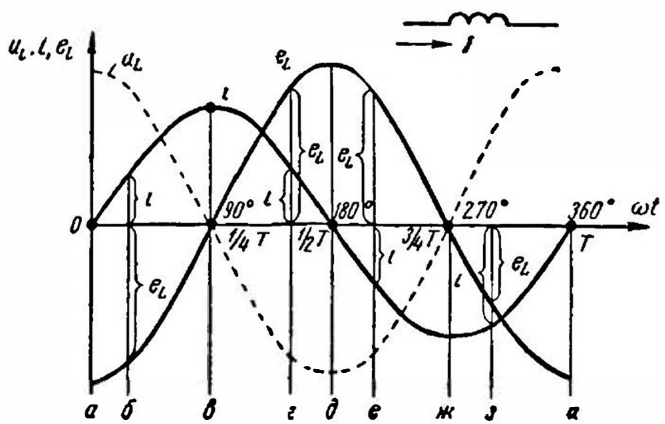
Рассмотрим внимательнее изменение переменного тока за время одного периода. На фиг. 144 показана кривая изменения переменного тока. Первая половина периода разбита на мелкие одинаковые части.

За промежуток времени *0—1* величина тока изменилась от нуля до *1—1′*. Прирост величины тока за это время равен *а*.

За время, обозначенное отрезком *1—2*, мгновенная величина тока выросла до *2—2′*, причем прирост величины тока равен *б*.

В течение времени, обозначенного отрезком *2—3*, ток увеличивается до *3—3′*, прирост тока показывает отрезок *в* и т. д.

Так, с течением времени переменный ток возрастает до максимума (при 90°). Но, как видно из чертежа, прирост тока делается все меньше и меньше, пока, наконец, при максимальном значении тока этот прирост не станет равным нулю.



Фиг. 145. Э. д. с. самоиндукции в катушке, включенной в цепь переменного тока

При дальнейшем изменении тока от максимума до нуля убыль величины тока становится все больше и больше, пока, наконец, около нулевого значения ток, изменяясь с наибольшей скоростью, не исчезнет, но тут же появляется вновь, протекая в обратном направлении.

Рассматривая изменение тока в течение периода, мы видим, что с наибольшей скоростью изменяется ток около своих нулевых значений. Около максимальных значений скорость изменения тока падает, а при максимальном значении тока прирост его равен нулю. Таким образом, переменный ток меняется не только по величине и направлению, но также и по скорости своего изменения. Переменный ток, проходя по виткам катушки, создает переменное магнитное поле. Магнитные линии этого поля, пересекая витки своей же катушки, индуктируют в них э. д. с. самоиндукции.

На фиг. 145 кривая *i* показывает изменение переменного тока в катушке. Как было уже указано, величина э. д. с. самоин-

дукции зависит от скорости изменения тока и от индуктивности катушки. Но так как индуктивность катушки в нашем случае остается без изменения, э. д. с. самоиндукции будет зависеть только от скорости изменения тока. Выше было показано, что наибольшая скорость изменения тока имеет место около нулевых значений тока. Следовательно, наибольшее значение э. д. с. самоиндукции имеет в те же моменты.

В момент *а* ток резко и быстро увеличивается от нуля, а поэтому, как следует из вышеприведенной формулы, э. д. с. самоиндукции (кривая e_L) имеет отрицательное максимальное значение. Так как ток увеличивается, то э. д. с. самоиндукции по правилу Ленца должна препятствовать изменению (здесь увеличению) тока. Поэтому э. д. с. самоиндукции при возрастании тока будет иметь направление, обратное току (положение *б*), что следует также из указанной формулы. Скорость изменения тока по мере приближения его к максимуму уменьшается. Поэтому э. д. с. самоиндукции также уменьшается, пока, наконец, при максимуме тока, когда изменения его будут равны нулю, она не станет равной нулю (положение *в*).

Переменный ток, достигнув максимума, начинает убывать. По правилу Ленца э. д. с. самоиндукции будет мешать току убывать и, направленная уже в сторону протекания тока, будет его поддерживать (положение *г*).

При дальнейшем изменении переменный ток быстро убывает до нуля. Резкое уменьшение тока в катушке повлечет за собой также быстрое уменьшение магнитного поля и в результате пересечения магнитными линиями витков катушки в них будет индуктироваться наибольшая э. д. с. самоиндукции (положение *д*).

Во вторую половину периода изменения тока картина повторяется и снова при возрастании тока э. д. с. самоиндукции будет мешать ему, имея направление, обратное току (положение *е*).

При убывании тока э. д. с. самоиндукции, имея направление в сторону тока, будет поддерживать его, не давая ему исчезнуть сразу (положение *з*).

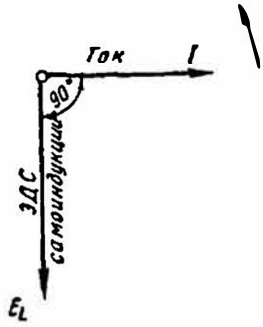
На рисунке видно, что э. д. с. самоиндукции отстает по фазе от тока на 90° или на $^1/_4$ периода. Так как магнитный поток совпадает по фазе с током, то можно сказать, что э. д. с., наводимая магнитным потоком, отстает от него по фазе на 90° или на $^1/_4$ периода.

Нам уже известно, что две синусоиды, сдвинутые одна относительно другой на 90°, можно изобразить векторами, расположенными под углом 90° (фиг. 146).

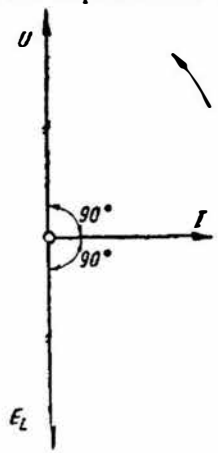
Так как э. д. с. самоиндукции в цепях переменного тока непрерывно противодействует изменениям тока, то, чтобы дать возможность току протекать по виткам катушки, напряжение сети должно уравновешивать э. д. с. самоиндукции. Иными словами, напряжение сети в каждый момент времени должно быть равно и противоположно э. д. с. самоиндукции.

Вектор напряжения сети, равный и противоположный э. д. с. самоиндукции E_L, мы обозначим через U (фиг. 147). Только при условии, что к зажимам катушки будет приложено напряжение сети, равное и противоположное э. д. с. самоиндукции, и, стало быть, это напряжение сети U уравновесит э. д. с. самоиндукции E_L, по катушке сможет проходить переменный ток I.

Но в этом случае напряжение сети U будет опережать по фазе ток I на 90°.



Фиг. 146. Ток в катушке опережает э. д. с. самоиндукции по фазе на 90°



Фиг. 147. Приложенное к катушке напряжение сети опережает ток на 90° и противоположно э. д. с. самоиндукции

Таким образом, в цепях переменного тока э. д. с. самоиндукции, возникая непрерывно, вызывает сдвиг фаз между током и напряжением. Возвращаясь к фиг. 145, мы видим, что ток i по катушке будет проходить и тогда, когда напряжение сети (кривая u_L) равно нулю (положение *в*), и даже тогда, когда напряжение сети направлено в сторону, обратную току (положения *г* и *з*).

Итак отметим, что в цепи переменного тока, когда э. д. с. самоиндукции отсутствует, напряжение сети и ток совпадают по фазе. Индуктивная же нагрузка в цепях переменного тока (обмотки электродвигателей и генераторов, обмотки трансформаторов, индуктивные катушки) всегда вызывает сдвиг фаз между током и напряжением.

Можно показать, что скорость изменения тока пропорциональна угловой частоте ω. Следовательно, действующее значение э. д. с. самоиндукции E_L может быть найдено по формуле:

$$E_L = \omega L I = 2\pi f L I.$$

Как было отмечено выше, напряжение, приложенное к зажимам цепи, содержащей индуктивность, в каждый момент времени должно быть по величине равно э. д. с. самоиндукции:

$$U_L = E_L.$$

Поэтому

$$U_L = 2\pi f L I.$$

Обозначая

$$2\pi f L = x_L, \text{ получим } U_L = x_L I.$$

Формула закона Ома для цепи переменного тока, содержащей индуктивность, будет такова:

$$I = \frac{U_L}{x_L}$$

Величина x_L называется индуктивным сопротивлением цепи, или реактивным сопротивлением индуктивности, и измеряется в омах. Таким образом, индуктивное сопротивление представляет собой своеобразное препятствие, которое оказывает цепь изменениям тока в ней. Оно равно произведению индуктивности на угловую частоту.

$$x_L = \omega L.$$

Индуктивное сопротивление проводника зависит от частоты переменного тока и индуктивности проводника. Поэтому сопротивление катушки, включаемой в цепь токов различной частоты, будет различным. Например, если имеется катушка с индуктивностью 0,05 *гн*, то в цепи тока частотой 50 *гц* ее индуктивное сопротивление будет:

$$x_{L_1} = 2\pi f_1 L = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}05 = 15{,}7 \text{ ом},$$

а в цепи тока частотой 400 *гц*

$$x_{L_2} = 2\pi f_2 L = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 400 \cdot 0{,}05 = 125{,}6 \text{ ом}.$$

Та часть напряжения сети, которая идет на преодоление (уравновешивание) э. д. с. самоиндукции, называется индуктивным падением напряжения или реактивной слагающей напряжения.

$$U_L = x_L I.$$

Рассмотрим теперь, какая мощность потребляется от источника переменного напряжения, если к зажимам его подключена индуктивность.

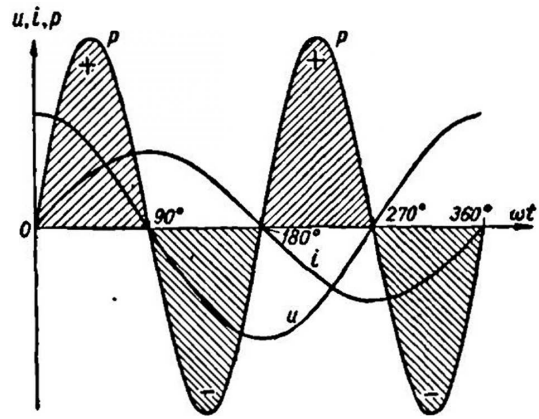
На фиг. 148 даны кривые мгновенных значений напряжения, тока и мощности для этого случая. Мгновенное значение мощ-

ности равно произведеиию мгновенных значений напряжения и тока:

$$p = ui.$$

Из чертежа видно, что если u и i имеют одинаковые знаки, то кривая p положительная и располагается выше оси ωt. Если же u и i имеют разные знаки, то кривая p отрицательна и располагается ниже оси ωt.

В первую четверть периода ток, а вместе с ним и магнитный поток катушки увеличиваются. Катушка забирает из сети мощ-



Фиг. 148. Кривые мгновенных значений напряжения, тока и мощности для цепи, содержащей индуктивность

ность. Площадь, заключенная между кривой p и осью ωt, есть работа (энергия) электрического тока. За первую четверть периода энергия, забираемая из сети, идет на создание магнитного поля вокруг витков катушки (мощность положительная). Количество энергии, запасаемое в магиитном поле за время роста тока, можно определить по формуле:

$$A_м = \frac{LI^2_m}{2}.$$

За вторую чегверть периода ток убывает. Э. д. с. самоиндукции, которая в первую четверть периода стремилась помешать возрастанию тока, теперь, когда ток начинает уменьшаться, будет мешать ему уменьшаться. Сама катушка становится как бы генератором электрической энергии. Она возвращает в сеть энергию, запасенную в ее магнитном поле. Мощность отрицательиа, и на фиг. 148 крнвая p располагается ниже оси ωt.

За вторую половииу периода явление повторяется. Таким образом, между источником переменного напряжеиия и катуш-

кой, содержащей индуктивность, происходит обмен мощностью. В течение первой и третьей четвертей периода мощность поглощается катушкой, в течение второй и четвертой четвертей мощность возвращается источнику.

В этом случае, в среднем, расхода мощности не будет, несмотря на то, что на зажимах цепи есть напряжение U и в цепи протекает ток I.

Тот же результат мы получим, если вычислим среднюю или активную мощность по формуле, приведеиной выше:

$$P = UI \cos \varphi.$$

В нашем случае между напряжеиием и током существует сдвиг фаз, равный 90°, и $\cos 90° = 0$.

Поэтому активная мощность также равна нулю, т. е. расхода мощности нет.

§ 87. Поверхностный эффект

Сущность этого явления заключается в следующем. Как известно, магнитные линии поля прямолинейного проводника имеют форму концентрических окружностей. Магнитное поле образуется как внутри проводника, так и в пространстве, окружающем проводник. Прямолинейный проводник с током мы можем разбить на отдельные нити тока, параллельные друг другу. Чем ближе такая нить лежит к оси самого проводника, тем больший магнитный поток, замыкающийся внутри проводника, ее охватывает. Индуктивность нити тока и индуктивное сопротивление пропорциональны магнитному потоку, сцепленному с ней. Поэтому внутренние нити проводника, по которым проходит переменный ток, имеют большее индуктивное сопротивление, чем наружные периферийные нити. Последнее вызывает неравномерное распределеиие тока по сечению проводника, так что плотность тока будет возрастать от оси к поверхности проводника. Это явление называется поверхностным эффектом. Неравномерное распределение плотности тока приводит к увеличению сопротивления проводника. Сопротивление проводника переменному току с учетом поверхностного эффекта мы назвали активным сопротивлением в отличие от сопротивления (омического), которое оказал бы этот проводник постоянному току.

При стандартной частоте 50 *гц*, небольшом сечении и медных проводах явление поверхностного эффекта сказывается слабо. При высокой частоте, большом сечении и железных проводах оно значительно.

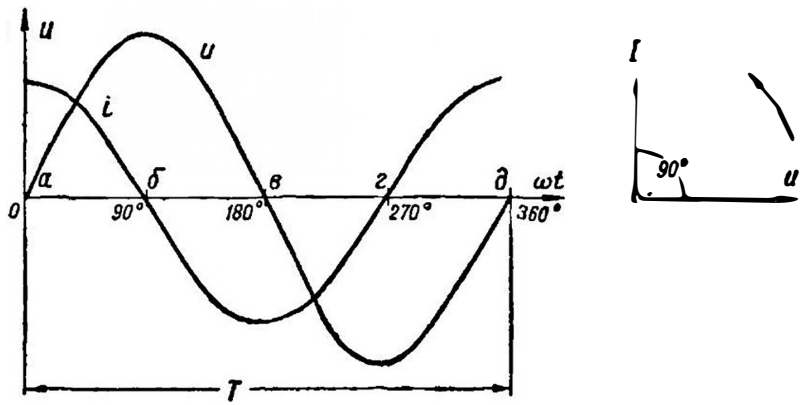
§ 88. Цепь переменного тока, содержащая емкость

Если в цепь постоянного тока включить кондеисатор (идеальный — без потерь), то в течение очень короткого времени после включения по цепи потечет зарядный ток. После того как кон-

денсатор зарядится до напряжения, соответствующего напряжению источника, кратковременный ток в цепи прекратится. Следовательно, для постоянного тока конденсатор представляет собой разрыв цепи или бесконечно большое сопротивление.

Если же конденсатор включить в цепь переменного тока, то он будет заряжаться попеременно то в одном то в другом направлении.

При этом в цепи будет проходить переменный ток. Рассмотрим это явление подробнее.



Фиг. 149. Графики и векторная диаграмма для цепи переменного тока, содержащей емкость

В момент включения напряжение на конденсаторе равно нулю. Если включить конденсатор к переменному напряжению сети, то в течение первой четверти периода, когда напряжение сети будет возрастать (фиг. 149), конденсатор будет заряжаться.

По мере накопления зарядов на обкладках конденсатора напряжение конденсатора увеличивается. Когда напряжение сети к концу первой четверти периода достигнет максимума, заряд конденсатора прекращается и ток в цепи становится равным нулю.

Ток в цепи конденсатора можно определить по формуле:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

где q — количество электричества, протекающее по цепи.

Из электростатики известно:

$$q = Cu_C = Cu,$$

где C — емкость конденсатора;

u — напряжение сети;

u_C — напряжение на обкладках конденсатора.

Окончательно для тока имеем:

$$i = C\frac{\Delta u_C}{\Delta t} = C\frac{\Delta u}{\Delta t}.$$

Из последнего выражения видно, что, когда $\frac{\Delta u}{\Delta t}$ максимально (положения *а, в, д*), i также максимально.

Когда $\frac{\Delta u}{\Delta t} = 0$ (положения *б, г* на фиг. 149), то i также равно нулю.

Во вторую четверть периода напряжение сети будет уменьшаться, и конденсатор начнет разряжаться. Ток в цепи меняет свое направление на обратное. В следующую половину периода напряженне сети меняет свое направление и наступает перезаряд конденсатора и затем снова его разряд. Из фиг. 149 видно, что ток в цепи с емкостью в своих изменениях опережает по фазе на 90° $\left(\frac{\pi}{2}\right)$ напряжение на обкладках конденсатора.

Сравнивая векторные диаграммы цепей с индуктивностью и емкостью, мы видим, что индуктивность и емкость на фазу тока влияют прямо противоположно.

Поскольку мы отметили выше, что скорость изменения тока пропорциональна угловой частоте ω, из формулы

$$i = C\frac{\Delta u}{\Delta t}$$

получаем аналогично, что скорость изменения напряжения также пропорциональна угловой частоте ω и для действующего значения тока имеем

$$I = 2\pi fCU.$$

Обозначая $x_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{\omega C}$,

где x_C называется емкостным сопротивлением, или реактивным сопротивлением емкости, получаем выражение закона Ома для цепи переменного тока, содержащей емкость,

$$I = \frac{U}{x_C}.$$

Напряжение на обкладках конденсатора

$$U_C = I_C x_C.$$

Та часть напряжения сети, которая имеется на конденсаторе, называется емкостным падением напряжения, или реактивной слагающей напряжения, и обозначается U_C.

Емкостное сопротивление x_C, так же как индуктивное сопротивление x_L, зависит от частоты переменного тока.

Но если с увеличением частоты индуктивное сопротивление увеличивается, то емкостное сопротивление, наоборот, будет уменьшаться.

Пример 6. Определить сопротивление конденсатора емкостью 5 *мкф* при частоте 50 *гц*:

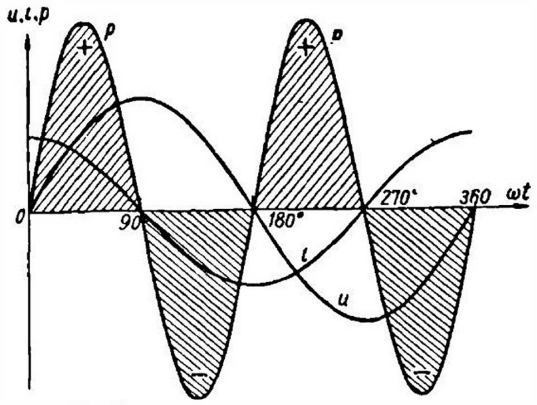
$$x_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 636 \text{ ом},$$

при частоте 400 *гц*:

$$x_C = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 400 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 79{,}5 \text{ ом}.$$

Применим формулу средней или активной мощности для рассматриваемой цепи:

$$P = UI \cos \varphi.$$



Фиг. 150. Кривая мгновенной мощности в цепи с емкостью

Так как в цепи с емкостью ток опережает напряжение на 90°, то

$$\varphi = 90°; \cos \varphi = 0.$$

Поэтому активная мощность также равна нулю, т. е. в такой цепи, как и в цепи с индуктивностью, расхода мощности нет.

На фиг. 150 показана кривая мгновенной мощности в цепи с емкостью. Из чертежа видно, что в первую четверть периода цепь с емкостью забирает из сети энергию, которая запасается в электрическом поле конденсатора.

Энергию, запасаемую конденсатором к моменту прохождения

напряжения на нем через максимум, можно определить по формуле:

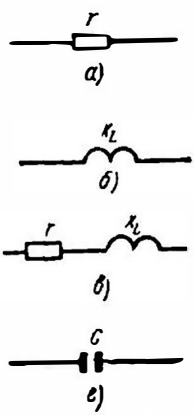
$$A_э = \frac{CU_m^2}{2}.$$

В следующую четверть периода конденсатор разряжается на сеть, отдавая ей ранее запасенную в нем энергию.

За вторую половину периода явление колебаний энергии повторяется. Таким образом, в цепи с емкостью происходит лишь обмен энергией между сетью и конденсатором без ее потерь.

§ 89. Последовательное соединение активного и индуктивного сопротивлений (r, x_L)

На схемах цепей переменного тока сопротивления обозначаются, как показано на фиг. 151. На практике часто встречаются проводники, обладающие как активным, так индуктивным и емкостным сопротивлениями.



Фиг. 151. Обозначения сопротивлений в цепях переменного тока

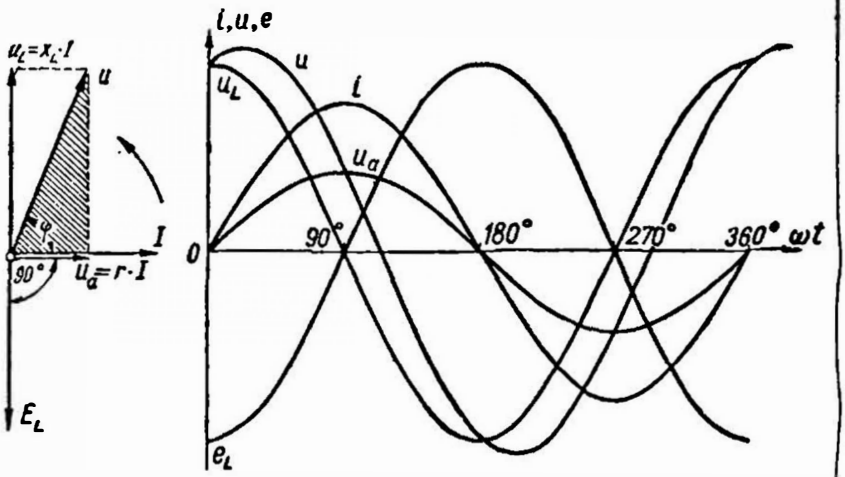
Пусть необходимо определить напряжение сети, которое нужно приложить к зажимам индуктивной катушки, чтобы по ней мог проходить переменный ток. Катушка имеет активное и индуктивное сопротивления. Поэтому напряжение сети должно уравновесить активное падение напряжения, а также э. д. с. самоиндукции, возникающую в катушке.

Построим векторную диаграмму и графики для этого случая.

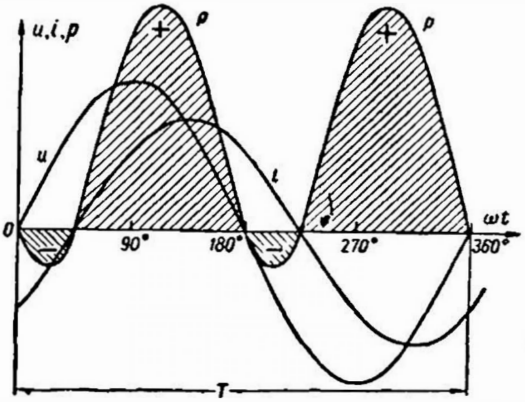
На фиг. 152 вектор I обозначает переменный ток катушки. Э. д. с. самоиндукции E_L в катушке отстает по фазе от тока на 90°.

Часть напряжения сети, уравновешивающая э. д. с. самоиндукции, показана вектором U_L, который равен и противоположен вектору E_L. Часть напряжения сети, уравновешивающая падение напряжения в активном сопротивлении, изображена вектором U_a, совпадающим по фазе с током. Напряжение сети должно быть равно геометрической сумме активного U_a и индуктивного U_L падений напряжения. Геометрическая сумма берется потому, что U_a и U_L на фиг. 152 изображаются векторами, а векторы складываются геометрически.

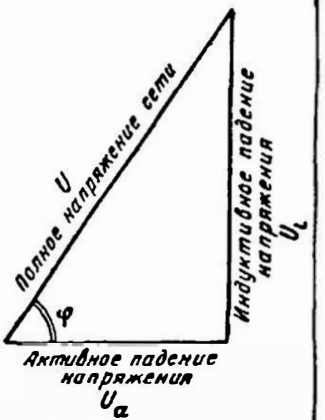
Оба эти напряжения расположены под углом одно к другому. Поэтому для получения их геометрической суммы необходимо на векторах U_a и U_L построить параллелограмм. Его диагональ (равнодействующая) даст напряжение сети.



Фиг. 152. Векторная диаграмма и графики для последовательного соединения r и L



Фиг. 153. Графики мгновенной мощности для цепи с последовательным соединением r и L



Фиг. 154. Треугольник напряжений

Как видно из фиг. 152, вектор напряжения сети U опережает вектор тока I на угол φ:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L}{U_a} = \frac{Ix_L}{Ir} = \frac{x_L}{r}.$$

В катушке, содержащей только индуктивное сопротивление, напряжение сети опережало ток на угол 90°, а при учете активного сопротивления напряжение сети опережает ток на угол, меньший чем 90°. И только когда индуктивность равна нулю, ток в катушке совпадает по фазе с напряжением сети.

Построим график мгновенной мощности для последовательного соединения сопротивления и индуктивности (фиг. 153).

Из представленного графика видно, что средняя или активная мощность не равна нулю, как было в цепи с индуктивностью или емкостью. В этом случае в течение некоторой части периода мощность в цепи тратится на нагрев сопротивления и образование магнитного поля катушки (мощность положительна). В течение другой части периода мощность возвращается сети (мощность отрицательна).

Таким образом, средняя или активная мощность P переменного тока зависит не только от величин напряжения U и тока I, но также и от сдвига фаз φ между ними. Чем больше сдвиг фаз между напряжением и током, т. е. чем больше угол φ, тем меньше $\cos\varphi$ и тем меньше активная мощность.

§ 90. Треугольник напряжений

Заштрихованный на фиг. 152 треугольник напряжений начертим отдельно (фиг. 154). Так как этот треугольник прямоугольный, то в случае, когда одна сторона неизвестна, ее можно определить с помощью теоремы Пифагора (квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов). Следовательно,

$$U^2 = U_a^2 + U_L^2,$$

откуда

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}.$$

Пример 7. Определить напряжение сети, которое необходимо приложить к зажимам катушки, чтобы создать в ней ток в 5 *а*, если активное сопротивление катушки r равно 6 *ом*, а индуктивное сопротивление x_L равно 8 *ом*.

Активное падение напряжения

$$U_a = I \cdot r = 5 \cdot 6 = 30 \text{ в}.$$

Индуктивное падение напряжения

$$U_L = I \cdot x_L = 5 \cdot 8 = 40 \text{ в}.$$

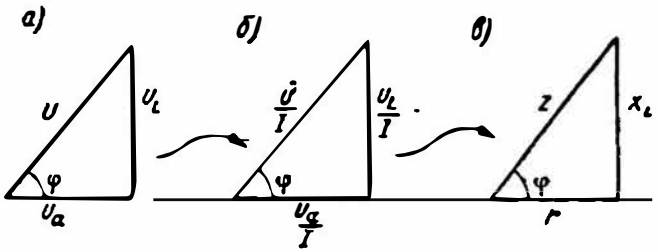
Полное падение напряжения равно напряженню сети:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = \sqrt{900 + 1\,600} = \sqrt{2500} = 50 \text{ в}.$$

Необходнмо отметнть, что показание вольтметра сети не равно арифметической сумме значений U_a и U_L $(30 + 40 \neq 50)$.

§ 91. Треугольннк сопротивлений

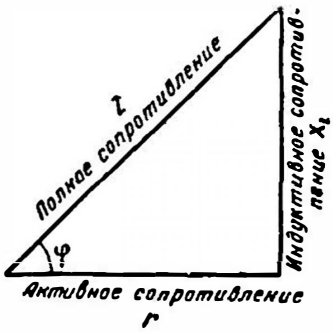
Если стороны треугольника напряжений (фиг. 155, *а*) разделить иа ток I (фиг. 155, *б*), то углы треугольника от этого не из-



Фиг. 155. Получеине треугольника сопротивлений

менятся, и мы получим новый треугольиик, подобный первому — треугольник сопротивлений (фиг. 155, *в*).

В треугольнике сопротивлеиия, показанном отдельно иа фиг. 156, все стороны обозначают сопротивления, причем гипотеиуза его является полным или кажущимся сопротнвлением цепи.



Фиг. 156. Треугольнник сопротнвлений

Из треугольника сопротивлений видно, что полное или кажущееся сопротивление z равно геометрической сумме активного r и индуктивного x_L сопротивлений.

Прнменяя теорему Пифагора к треугольнику сопротивлений, получаем:

$$z^2 = r^2 + x^2_L,$$

откуда

$$z = \sqrt{r^2 + x^2_L}.$$

Если одно из сопротивленнй цепи (активное или реактивное), например, в 10 и более раз меньше другого, то меньшим можно пренебречь, в чем легко убедиться непосредственным расчетом.

Пример 8. Определить полное сопротивление цепи, в которой $r = 9$ *ом* и $x_L = 12$ *ом*.

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{9^2 + 12^2} = \sqrt{81 + 144} = \sqrt{225} = 15 \text{ ом}.$$

Было бы совершенно неправильно, если бы для определения полного сопротивления были арифметически сложены оба сопротивления r и x_L, так как

$$9 + 12 = 21 \text{ ом}.$$

Результат, как видим, в этом случае получается неверный.

Пример 9. Полное сопротивление обмотки электромагнита $z = 25$ *ом*. Активное сопротивление обмотки $r = 15$ *ом*. Определить индуктивное сопротивление.

Так как

$$z^2 = r^2 + x_L^2,$$

то

$$x_L^2 = z^2 - r^2,$$

откуда

$$x_L = \sqrt{z^2 - r^2}.$$

Поэтому

$$x_L = \sqrt{25^2 - 15^2} = \sqrt{625 - 225} = \sqrt{400} = 20 \text{ ом}.$$

Пример 10. Индуктивное сопротивление обмотки электродвигателя переменного тока равно 14 *ом*. Полное сопротивление ее равно 22 *ом*. Найти активное сопротивление.

Так как

$$z^2 = r^2 + x_L^2,$$

то

$$r^2 = z^2 - x_L^2,$$

откуда

$$r = \sqrt{z^2 - x_L^2}.$$

Поэтому

$$r = \sqrt{22^2 - 14^2} = \sqrt{484 - 196} = \sqrt{288} = 16{,}97 \text{ ом}.$$

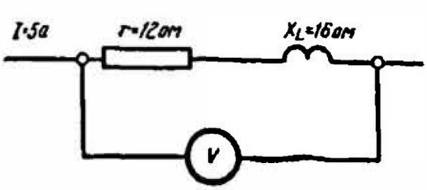
Пример 11. В цепи, изображенной на фиг. 157, определить показание вольтметра.

$$U_a = I \cdot r = 5 \cdot 12 = 60 \text{ в}.$$

$$U_L = I \cdot x_L = 5 \cdot 16 = 80 \text{ в}.$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = \sqrt{60^2 + 80^2} =$$

$$= \sqrt{3600 + 6400} = \sqrt{10\,000} = 100 \text{ в}.$$



Фиг. 157. К примеру 11

Определим общее сопротивление:

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{12^2 + 16^2} = \sqrt{144 + 256} = \sqrt{400} = 20 \text{ ом}.$$

Если умножить z на ток I, получим:

$$U = I \cdot z = 5 \cdot 20 = 100 \text{ в},$$

т. е. тот же результат, что и выше.

Следовательно, если

$$U_a = Ir$$

и

$$U_L = Ix_L,$$

то

$$U = Iz.$$

§ 92. Закон Ома для цепи с активным сопротивлением и индуктивностью (r, L)

Из формулы $U = I \cdot z$ видно, что

$$I = \frac{U}{z} \text{ или } I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}}$$

Это и есть формула закона Ома для цепи с последовательным соединением r и L.

Пример 12. Определить ток, проходящий через катушку, индуктивное сопротивление которой равно 5 *ом*, а активное сопротивление равно 1 *ом*, если напряжение сети переменного тока равно 12 *в*.

Определим полное сопротивление катушки:

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{1^2 + 5^2} = \sqrt{26} = 5{,}1 \text{ ом}.$$

Применяя формулу закона Ома для цепи r, L, получим:

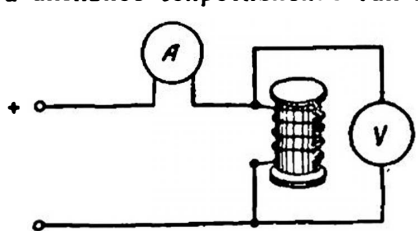
$$I = \frac{U}{z} = \frac{12}{5{,}1} = 2{,}35 \text{ а}.$$

В частных случаях, когда в цепи переменного тока имеется только активное сопротивление r, ток определяется по формуле:

$$I = \frac{U}{r}.$$

В случаях, если в цепи имеется индуктивное сопротивление, а активное сопротивление так мало, что им можно пренебречь, формула закона Ома приобретает вид:

$$I = \frac{U}{x_L}.$$



Фиг. 158. Определение активного сопротивления потребителя переменного тока

Если необходимо узнать активное сопротивление потребителя переменного тока, обладающего некоторым кажущимся сопротивлением (обмотка электродвигателя, ин-

дукционной катушки или электромагнита), то нужно включить этот потребитель в цепь постоянного тока (фиг. 158). Деля показание вольтметра, включенного к зажимам потребителя, на показание амперметра, включенного последовательно в цепь, получим величину активного сопротивления, так как

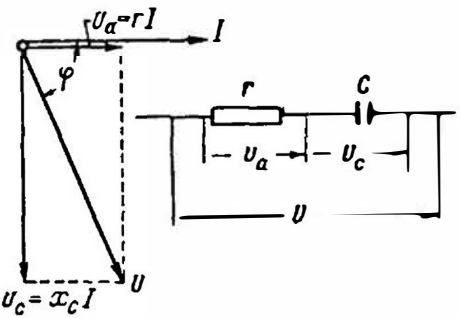
$$r = \frac{U}{I}.$$

Сказанное справедливо только при низких частотах, когда явлением поверхностного эффекта можно пренебречь и считать активное сопротивление потребителя равным его сопротивлению при постоянном токе.

§ 93. Последовательное соединение активного сопротивления и емкости (r, C)

На фиг. 159 даны схема и векторная диаграмма для цепи с последовательным соединением активного сопротивления и емкости. Напряжение сети U представляет собой геометрическую сумму падений напряжения на отдельных участках цепи, т. е. активного падения напряжения U_a, совпадающего по фазе с током, и падения напряжения на емкостном сопротивлении U_C, отстающего от тока по фазе на 90°. Напряжение, приложенное к зажимам цепи, отстает по фазе от тока на угол φ, тангенс угла которого найдем из векторной диаграммы фиг. 159:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_C}{U_a} = \frac{x_C I}{rI} = \frac{x_C}{r} = \frac{1}{r\omega C}.$$



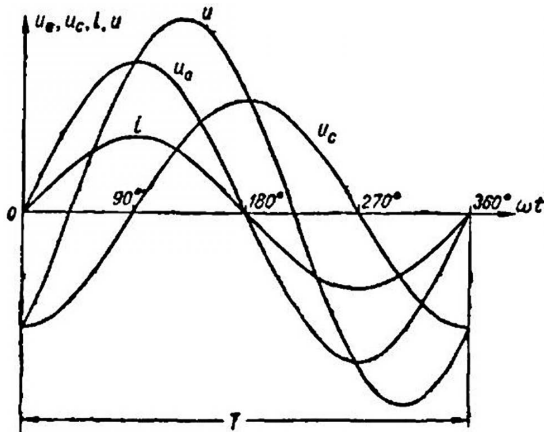
Фиг. 159. Последовательное соединение r и C

Последовательное соединение активного сопротивления и емкости имеет прикладное значение. Включение конденсатора с реальным диэлектриком в цепь переменного тока можно представить схематически как последовательное соединение r и C. Если бы сопротивление диэлектрика было бесконечно велико ($r = \infty$ — идеальный диэлектрик), то угол сдвига фаз между напряжением и током был бы 90°. Однако ток проводимости, вызванный несовершенством диэлектрика, уменьшает угол сдвига фаз. Разность между 90° и углом сдвига фаз между напряжением и током обозначается буквой δ (дельта) и называется углом диэлектрических потерь.

Мощность потерь в диэлектрике или диэлектрические потери определяются по формуле:

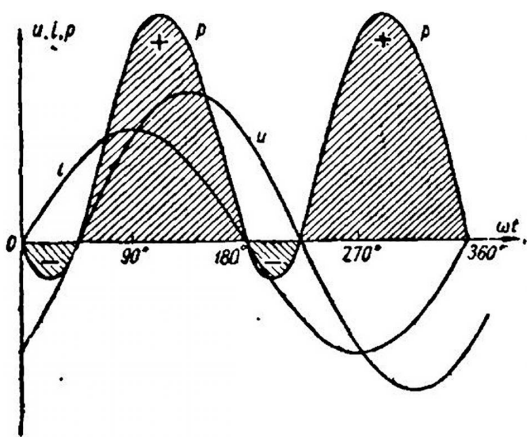
$$P = U^2 2\pi f C \operatorname{tg}\delta \ вт,$$

где U — напряжение в $в$;
f — частота тока в $гц$;
C — емкость конденсатора в $ф$;



Фиг. 160. Кривые мгновенных значений напряжения и тока для цепи с последовательным соединением r и C

На фиг. 160 даны кривые мгновенных значений напряжений и тока для последовательного соединения r и C. Кривая мгновенной мощности для этого случая показана на фиг. 161.



Фиг. 161. Кривая мгновенной мощности для цепи с последовательным соединением r и C

Из чертежа видно, что в течение некоторой части периода энергия затрачивается в цепи на нагрев сопротивления r и образование электрического поля (мощность положительная). В течение другой части периода энергия, накопленная в электрическом поле конденсатора, возвращается обратно в сеть.

Активная мощность по-прежнему равна:

$$P = UI\cos\varphi.$$

Из векторной диаграммы находим:

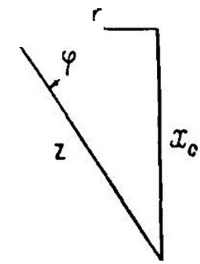
$$U = \sqrt{I^2r^2 + I^2x_C^2} = I\sqrt{r^2 + x_C^2},$$

обозначая

$$z = \sqrt{r^2 + x_C^2},$$

получаем закон Ома для цепи с последовательным соединением активного сопротивления и емкости (цепи r и C):

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_C^2}}$$



Фиг. 162. Треугольник сопротивлений для последовательного соединения r и C

где z — полное сопротивление цепи.

Деля стороны треугольника напряжений (фиг. 159) на ток I, получим треугольник сопротивлений для той же цепи (фиг. 162).

§ 94. Последовательное соединение активного сопротивления, индуктивности и емкости (r, L, C)

На фиг. 163 даны схема и векторная диаграмма для цепи с последовательным соединением активного сопротивления, индуктивности и емкости.

Напряжение на зажимах цепи равно сумме падений напряжения на отдельных участках цепи: активного падения напряжения и падений напряжений на индуктивном и емкостном сопротивлениях.

Напряжения U_L и U_C сдвинуты между собой по фазе на полпериода (180°). Поэтому при геометрическом сложении векторов они взаимно вычитаются.

Из векторной диаграммы находим:

$$U = \sqrt{I^2r^2 + I^2(x_L - x_C)^2} = I\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}.$$

Закон Ома для данной цепи будет:

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{U}{z},$$

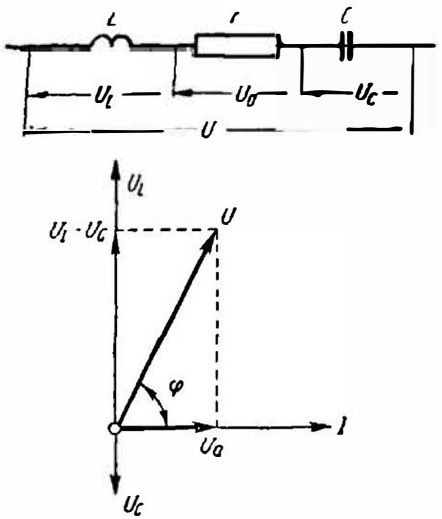
где полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}.$$

При $x_L = x_C$ ток в цепи будет равен:

$$I = \frac{U}{r},$$

т. е. цепь будет вести себя так, как будто она содержит только одно активное сопротивление. При этом ток и напряжение сети совпадают по фазе. Этот случай называется резонансом напряжений. График и векторная диаграмма для резонанса напряжений показаны на фиг. 164. Условием резонанса напряжений является равенство



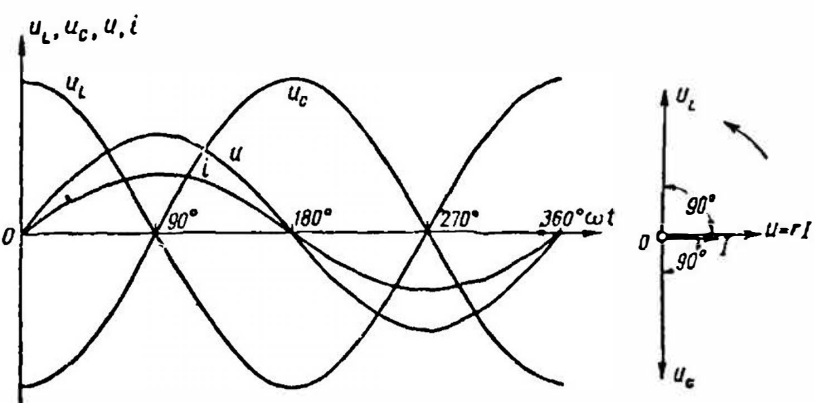
Фиг. 163. Последовательное соединение r, L и C

$$x_L = x_C \text{ или } \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Поэтому резонанс напряжений может наступить:

1) если при постоянной индуктивности емкость меняется и становится равной:

$$C = \frac{1}{\omega^2 L};$$



Фиг. 164. Графики и векторная диаграмма для резонанса напряжений

2) если при постоянной емкости меняется индуктивность и становится равной:

$$L = \frac{1}{\omega^2 C};$$

3) если изменение обеих величин L и C приводит к равенству:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C};$$

4) если, наконец, угловая частота сети, изменяясь, становится равной:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Пример 13. Имеется цепь, состоящая из последовательно соединенных активного сопротивления, индуктивности и емкости, причем $r = 6$ *ом*, $x_L = 10$ *ом*; $x_C = 2$ *ом*. Напряжение на зажимах цепи 120 *в*. Определить ток цепи при заданных сопротивлениях, а также ток при резонансе напряжений, если $x_L = x_C = 10$ *ом*.

Ток в цепи

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} = \frac{120}{\sqrt{6^2 + (10-2)^2}} = \frac{120}{10} = 12 \text{ а}.$$

Напряжения на отдельных участках цепи:

$$U_a = Ir = 12 \cdot 6 = 72 \text{ в};$$
$$U_L = Ix_L = 12 \cdot 10 = 120 \text{ в};$$
$$U_C = Ix_C = 12 \cdot 2 = 24 \text{ в}.$$

Ток при резонансе напряжений

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{6} = 20 \text{ а}.$$

Напряжения на отдельных участках цепи:

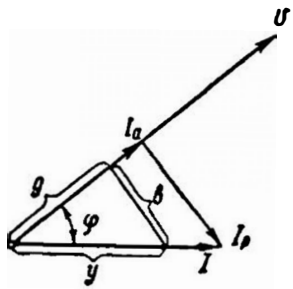
$$U_a = Ir = 20 \cdot 6 = 120 \text{ в};$$
$$U_L = Ix_L = 20 \cdot 10 = 200 \text{ в};$$
$$U_C = Ix_C = 20 \cdot 10 = 200 \text{ в}.$$

Как видно из примера, ток при резонансе напряжений увеличился, напряжения на отдельных участках цепи выросли. При известных условиях это может представить некоторую опасность для установок переменного тока, так как чрезмерное увеличение напряжения на участках цепи может привести к пробою изоляции катушек, аппаратов, приборов, пробою диэлектрика конденсатора и т. д.

§ 95. Проводимость при перемеином токе

Решение вопросов, связанных с параллельным соединением цепей переменного тока, так же как и при постояином токе, производится при помощи проводимостей.

Пусть мы имеем векторную диаграмму, изображенную на фиг. 165. Проектируя вектор тока I на направление вектора напряжения U, разложим вектор тока на две составляющие.



Фиг. 165. Разложение тока на активную и реактивную составляющие

Одна из составляющих совпадает по направлению с вектором напряжения и называется активной составляющей тока. Она обозначается буквой I_a и равна:

$$I_a = I \cos \varphi.$$

Другая составляющая, перпендикулярная вектору напряжения, называется реактивной составляющей тока, обозначается I_p и равна:

$$I_p = I \sin \varphi.$$

По закону Ома для цепей переменного тока имеем:

$$I = \frac{U}{z}.$$

Из прямоугольника сопротивлений легко получить:

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}; \quad \sin \varphi = \frac{x}{z}.$$

Используя эти три выражения, получнм:

$$I_a = I \cos \varphi = \frac{U}{z} \cdot \frac{r}{z} = U \cdot \frac{r}{z^2}.$$

По аналогии с формулой постоянного тока ($I = Ug$) заменим в ней $\frac{r}{z^2}$ на g. Полученная формула будет иметь следующий вид:

$$I_a = Ug.$$

Величина g иазывается активной проводимостью. Соответствеино изложенному, получим:

$$I_p = I \sin \varphi = \frac{U}{z} \cdot \frac{x}{z} = U \cdot \frac{x}{z^2}.$$

Обозначив $\frac{x}{z^2}$ через b, получим:

$$I_p = Ub.$$

Величина b называется реактивной проводимостью.

Наконец,

$$I = \frac{U}{z} = U\frac{1}{z}.$$

Обозначив $\frac{1}{z}$ через y, получим:

$$I = U \cdot y.$$

Величина y называется полной проводимостью.

Активная, реактивная и полная проводимости измеряются в $\frac{1}{ом}$.

На фиг. 165 изображен треугольник токов со сторонами I, I_a, I_p.

По теореме Пифагора имеем:

$$I^2 = I_a^2 + I_p^2 \text{ или } I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}.$$

Разделив все стороны треугольника токов на U:

$$\frac{I_a}{U} = g;\ \frac{I_p}{U} = b;\ \frac{I}{U} = y,$$

получим треугольник проводимостей со сторонами g, b и y.

Из треугольника проводимостей имеем:

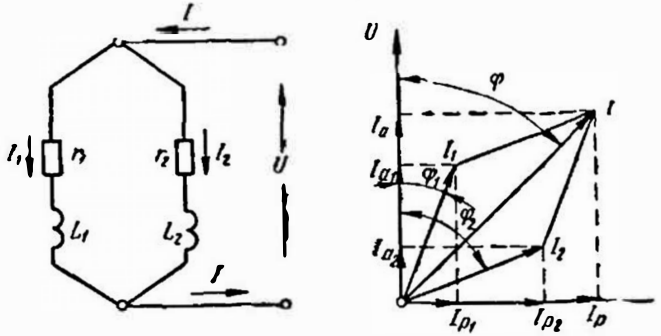
$$y^2 = g^2 + b^2 \text{ или } y = \sqrt{g^2 + b^2}.$$

§ 96. Разветвление цепи переменного тока

На фиг. 166 слева показано параллельное соединение двух ветвей r_1, L_1 и r_2, L_2.

Полные сопротивления ветвей будут равны:

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2};$$
$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2}.$$



Фиг. 166. Параллельные соединения ветвей r_1, L_1 и r_2, L_2

Токи ветвей:

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}};$$

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2}}.$$

Углы сдвига фаз между напряжением и токами в ветвях:

$$\cos\varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} \text{ и } \cos\varphi_2 = \frac{r_2}{z_2}.$$

На фиг. 166 справа дана векторная диаграмма для параллельного соединения ветвей r_1, L_1 и r_2, L_2. Построение диаграммы начинается с построения вектора напряжения, так как напряжение является общим для двух ветвей. Ввиду наличия в ветвях r и L токи I_1 и I_2 отстают по фазе от напряжения U на углы φ_1 и φ_2.

Построив векторы токов I_1 и I_2 и сложив их по правилу параллелограмма, получим вектор тока I, протекающего на общем участке цепи. Из построения диаграммы видно, что

$$I_a = I_{a_1} + I_{a_2}.$$

Заменив в уравнении выражения для токов через произведение напряжения на проводимость, получим:

$$Ug = Ug_1 + Ug_2$$

или

$$g = g_1 + g_2.$$

Аналогично:

$$I_p = I_{p_1} + I_{p_2};$$
$$Ub = Ub_1 + Ub_2;$$
$$b = b_1 + b_2.$$

Общий ток равен:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{U^2g^2 + U^2b^2} = U\sqrt{g^2 + b^2} = Uy.$$

Таким образом, цепь в целом обладает активной и реактивной проводимостями, равными сумме активных и реактивных проводимостей отдельных ветвей.

Пример 14. Для цепи, показанной на фиг. 166, дано:

$r_1 = 4$ *ом*; $L_1 = 0{,}01$ *гн*; $r_2 = 3$ *ом*; $L_2 = 0{,}02$ *гн*.

Напряжение сети 127 *в*, частота 50 *гц*.
Определить токи в ветвях и на общем участке цепи.

Решение.

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2} = \sqrt{4^2 + (2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}01)^2} = 5{,}075\ ом;$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{4}{5{,}075} = 0{,}788;\ \varphi_1 = 38°;$$

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2} = \sqrt{3^2 + (2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}02)^2} = 6{,}95\ ом;$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{3}{6{,}95} = 0{,}432;\ \varphi_2 = 64°20';$$

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{127}{5{,}075} = 25\ а;\ I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{127}{6{,}95} = 18{,}3\ а.$$

Для определения тока I находим проводимости:

$$g_1 = \frac{r_1}{z_1^2} = \frac{4}{5{,}075^2} = 0{,}155 \frac{1}{ом};$$

$$b_1 = \frac{x_1}{z_1^2} = \frac{314 \cdot 0{,}01}{5{,}075^2} = 0{,}122 \frac{1}{ом};$$

$$g_2 = \frac{r_2}{z_2^2} = \frac{3}{6{,}95^2} = 0{,}0622 \frac{1}{ом};$$

$$b_2 = \frac{x_2}{z_2^2} = \frac{314 \cdot 0{,}02}{6{,}95^2} = 0{,}13 \frac{1}{ом};$$

$$g = g_1 + g_2 = 0{,}155 + 0{,}0622 = 0{,}2172 \frac{1}{ом};$$

$$b = b_1 + b_2 = 0{,}122 + 0{,}13 = 0{,}252 \frac{1}{ом};$$

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{0{,}2172^2 + 0{,}252^2} = 0{,}332 \frac{1}{ом}.$$

Ток на общем участке цепи равен:

$$I = Uy = 127 \cdot 0{,}332 = 42{,}2\ а;$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g} = \frac{0{,}252}{0{,}2172} = 1{,}16;\ \varphi = 49°15',$$

Рассмотрим параллельное соединение ветвей, содержащих L и C (фиг. 167, слева):

полные сопротивления ветвей будут:

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2};$$

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2};$$

токи ветвей:

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + (\omega L_1)^2}};$$

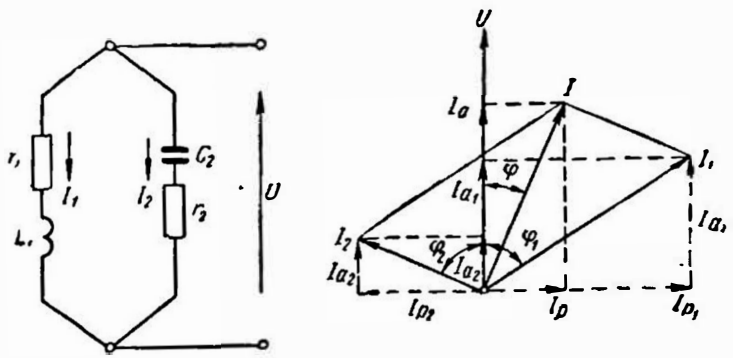
$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2}};$$

углы сдвига фаз между напряжением и токами в ветвях:

$$\cos\varphi_1 = \frac{r_1}{z_1};$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{z_2}.$$

Векторная диаграмма, показанная на том же чертеже справа, начинается с построения вектора напряжения U. Затем под



Фиг. 167. Параллельные соединения ветвей L и C

углами φ_1 и φ_2 строятся векторы токов I_1 и I_2. Следует заметить, что ток I_1 в ветви с индуктивностью отстает по фазе от напряжения на угол φ_1, а ток I_2 в цепи с емкостью опережает по фазе напряжение на угол φ_2. Складывая векторы токов I_1 и I_2 по правилу параллелограмма, получаем вектор тока I.

Из построения векторной диаграммы видно, что

$$I_a = I_{a_1} + I_{a_2}$$

или

$$Ug = Ug_1 + Ug_2,$$

откуда

$$g = g_1 + g_2.$$

Следовательно, активная проводимость цепи в целом равна сумме активных проводимостей отдельных ветвей.

Определим реактивную проводимость разветвления:

$$I_p = I_{p1} - I_{p2}$$

или

$$Ub = Ub_1 - Ub_2,$$

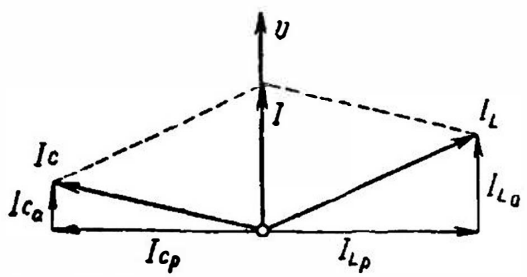
откуда

$$b = b_1 - b_2,$$

где b_2 — реактивная проводимость цепи с емкостью, равная

$$b_2 = \frac{x_c}{z_2^2} = \frac{\frac{1}{\omega C_2}}{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2} \cdot \frac{1}{ом}$$

Таким образом, реактивная проводимость цепи в целом равна разности реактивных проводимостей отдельных ветвей.



Фиг. 168. Векторная диаграмма резонанса токов

Путем подбора параметров цепи L, C, r_1, r_2 или частоты f можно добиться, что общий ток I совпадет по фазе с напряжением сети U. Этот случай называется резонансом токов.

Как видно из фиг. 168, резонанс токов наступает тогда, когда реактивные составляющие токов в ветвях с индуктивностью I_{Lp} и емкостью I_{Cp} равны между собой, т. е. $I_{Lp} = I_{Cp}$. При этом условии ток I на общем участке цепи совпадает по фазе с напряжением U.

При надлежащем выборе индуктивности, емкости и сопротивлений параллельных ветвей ток I в общей части цепи может быть невелик, в то время как токи в ветвях с индуктивностью и емкостью могут быть весьма значительны.

Пример 15. Для цепи, представленной на фиг. 167, дано:

$$r_1 = 5\ ом;\ L_1 = 0{,}05\ гн;\ r_2 = 5\ ом;\ C_2 = 100\ мкф,$$

напряжение сети 220 *в*, частота 50 *ец*.

Найти токи в ветвях и на общем участке цепи.

Решение.

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314 \frac{1}{сек};$$

$$z_1 = \sqrt{r^2 + (\omega L_1)^2} = \sqrt{5^2 + (314 \cdot 0{,}05)^2} = 16.5 \text{ ом};$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{5}{16{,}5} = 0{,}303; \quad \varphi_1 = 72°20';$$

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2} = \sqrt{5^2 + \left(\frac{1}{314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}\right)^2} = 32{,}2 \text{ ом};$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{5}{32{,}2} = 0{,}155; \quad \varphi_2 = 81°;$$

токи в ветвях:

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{220}{16{,}5} = 13{,}33 \text{ а};$$

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{220}{32{,}2} = 6{,}84 \text{ а};$$

проводимости ветвей:

$$g_1 = \frac{r_1}{z_1^2} = \frac{5}{16{,}5^2} = 0{,}0184 \frac{1}{\text{ом}};$$

$$g_2 = \frac{r_2}{z_2^2} = \frac{5}{32{,}2^2} = 0{,}0048 \frac{1}{\text{ом}};$$

$$b_1 = \frac{x_1}{z_1^2} = \frac{314 \cdot 0{,}05}{16{,}5^2} = 0{,}0579 \frac{1}{\text{ом}};$$

$$b_2 = \frac{x_2}{z_2^2} = \frac{\frac{1}{314 \cdot 100 \cdot 10^{-6}}}{32{,}2^2} = 0{,}0307 \frac{1}{\text{ом}};$$

проводимости всей цепи:

$$g = g_1 + g_2 = 0{,}0184 + 0{,}0048 = 0{,}0232 \frac{1}{\text{ом}};$$

$$b = b_1 - b_2 = 0{,}0579 - 0{,}0307 = 0{,}0272 \frac{1}{\text{ом}};$$

$$y = \sqrt{g^2 + b^2} = \sqrt{0{,}0232^2 + 0{,}0272^2} = 0{,}0358 \frac{1}{\text{ом}};$$

ток на общем участке цепи:

$$I = Uy = 220 \cdot 0{,}0358 = 7{,}9 \text{ а};$$

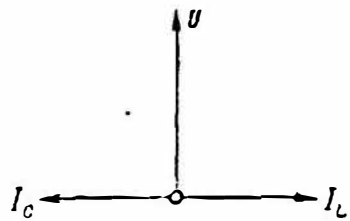
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{g} = \frac{0{,}0272}{0{,}0232} = 1{,}17; \quad \cos \varphi = 0{,}649;$$

$$\varphi = 49°30'.$$

§ 97. Колебательный контур

Рассматривая случай параллельного соединения индуктивности и емкости, мы видели, что на общем участке цепи ток может быть невелик, в то время как токи в параллельных ветвях могут достигать большой величины. Если рассмотреть случай, когда активные сопротивления параллельных ветвей равны нулю, токи в них будут сдвинуты по фазе на 90° относительно приложенного напряжения. Если к тому же добиться равенства реактивных сопротивлений ($x_L = x_C$), то в ветвях будут протекать равные токи. Общий ток при этом будет равен нулю.

Векторная диаграмма для такого случая изображена на фиг. 169.



Фиг. 169. Упрощенная векторная диаграмма резонанса токов

Так как общий ток равен нулю, то подводящие провода можно отключить от источника переменного напряжения. В замкнутом контуре, образованном катушкой и конденсатором, будет протекать переменный ток.

До сих пор мы рассматривали случаи, когда в электрических цепях протекали токи, получаемые от генераторов. Теперь мы рассмотрим случай получения переменного тока посредством разряда конденсатора на катушку.

Заряженный конденсатор обладает запасом электрической энергии. При замыкании на катушку он начнет разряжаться и запас электрической энергии в нем будет уменьшаться. Ток разряда конденсатора, проходя по виткам катушки, создает магнитное поле. Следовательно, катушка начнет запасать магнитную энергию. Когда конденсатор полностью разрядится, его электрическая энергия станет равной нулю. В этот момент катушка будет обладать максимальным запасом магнитной энергии. Теперь сама катушка становится генератором электрического тока и начнет перезаряжать конденсатор. Э. д. с. самоиндукции, возникающая в катушке в период нарастания магнитного поля, препятствовала протеканию тока. Теперь же, когда магнитное поле катушки будет уменьшаться, э. д. с. самоиндукции стремится поддержать ток в прежнем направлении. В момент, когда магнитная энергия катушки станет равной нулю, обкладки конденсатора окажутся заряженными противоположно тому, как они были заряжены вначале, и если сопротивление цепи равно нулю, то конденсатор получит первоначальный запас электрической энергии. Затем конденсатор вновь начнет разряжаться, создавая в цепи ток обратного направления, и процесс будет повторяться.

Попеременные превращения электрической энергии в магнитную и обратно составляют основу процесса электромагнитных колебаний. Цепь, состоящая из емкости и индуктивности, в которой происходит процесс электромагнитных колебаний, называется **колебательным контуром**.

Периодические колебания энергии, происходящие в колебательном контуре, могли бы продолжаться бесконечно долго в виде незатухающих колебаний, если бы отсутствовали потери в самом колебательном контуре. Однако наличие активного сопротивления приводит к тому, что запас энергии контура с каждым периодом уменьшается за счет потерь на тепло в активном сопротивлении, в результате чего колебания затухают.

Период электромагнитных колебаний, происходящих в колебательном контуре без сопротивления, определяется формулой Томпсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \text{ сек.}$$

Величина T называется **собственным периодом колебания контура**.

Собственная частота колебания контура f определяется по формуле:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \frac{1}{сек}$$

Таким образом, изменить время периода колебаний контура можно двумя способами — изменением индуктивности катушки или емкости конденсатора. Тот и другой способы используются для этой цели в радиотехнике.

Колебательный контур является необходимой принадлежностью каждого радиоприемника и радиопередатчика.

Принцип радиопередачи заключается в следующем. В антенне передающей радиостанции при помощи ламповых генераторов создаются электромагнитные колебания. Амплитуда колебаний зависит от ряда факторов и в том числе от величины тока, протекающего в цепи микрофона, принимающего звуковые колебания, обусловленные речью или музыкой.

Изменение колебаний высокой частоты с помощью звуковых колебаний называется **модуляцией**.

Антенна передающей радиостанции излучает в пространство модулированные электромагнитные волны. Достигая антенны радиоприемника, радиоволны индуктируют в ней слабую э. д. с., частота которой равна частоте приходящей волны. Теперь нужно дать возможность радиослушателю настроить свой приемник на нужную волну среди других волн многих работающих радиостанций. Для этой цели антенна соединяется с колебательным контуром. Путем изменения емкости или индуктивности можно добиться в контуре резонанса, вследствие чего переменная э. д. с., индуктированная в приемной антенне, будет усилена во много раз. Дальнейшее усиление полученных колебаний достигается

при помощи электронных ламп или полупроводниковых приборов. Частота электромагнитных колебаний, применяемых в радиотехнике, очень велика (порядка миллионов герц). Эти колебания не могут быть непосредственно преобразованы в колебания мембраны телефона и воздействовать на слух. Поэтому модулированные колебания высокой частоты, излучаемые антенной передающей станции, приходя в приемник, должны быть детектированы. Это производится при помощи кристаллического детектора, электронных ламп или полупроводников. Полученные в результате детектирования колебания низкой частоты подвергаются усилению и подаются на репродуктор.

Радиосвязь впервые была осуществлена выдающимся русским ученым А. С. Поповым (1859—1905).



А. С. Попов

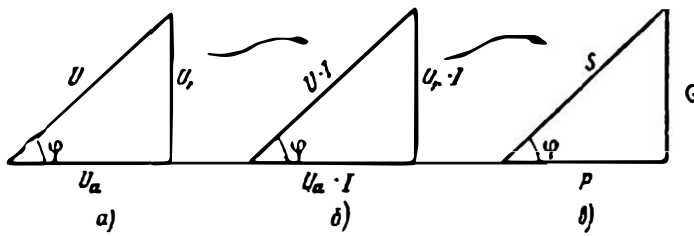
Александр Степанович Попов — изобретатель беспроволочного телеграфа (радио), имеющего огромное значение для человечества. Путем упорной работы А. С. Попов добился того, что сконструированный им радиоприемник принимал радиосигналы на расстоянии нескольких километров. 25 апреля (7 мая) 1895 г. А. С. Попов демонстрировал свой радиоприемник на заседании Русского физико-химического общества. Этот день считается днем создания радио. Испытывая свой радиоприемник, А. С. Попов обнаружил экранирующее действие и отражение радиосигналов металлическими предметами. На этом принципе основана радиолокация.

А. С. Попов был профессором и директором Петербургского электротехнического института — ныне ЛЭТИ имени В. И. Ульянова (Ленина).

Заслуги А. С. Попова в изобретении радио официально были отмечены в 1900 г. присуждением ему почетного диплома и золотой медали на 4-м Всемирном электротехническом конгрессе в Париже.

§ 98. Треугольник мощностей

Если величины сторон треугольника напряжений (фиг. 170, *а*) умножить на ток I (фиг. 170, *б*), то получим треугольник мощностей (фиг. 170, *в*). Все стороны треугольника мощностей, показанного отдельно на фиг. 171, представляют собой мощности.

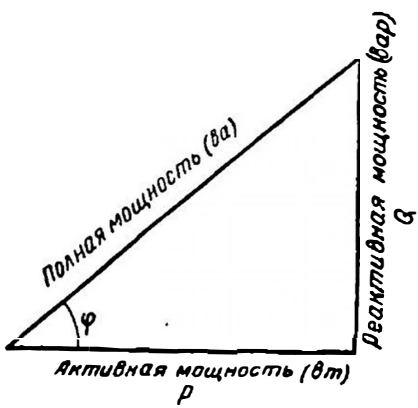


Фиг. 170. Получение треугольника мощностей

Гипотенуза треугольника мощностей есть полная мощность S.

$$S = UI.$$

Она измеряется в вольт-амперах (*ва*) или киловольт-амперах (*ква*) по показаниям вольтметра и амперметра. Величина полной мощности характеризует основные габариты (наибольшие размеры) генераторов и трансформаторов. В самом деле, изоляция обмоток генераторов и трансформаторов рассчитывается на определенное напряжение, а величина тока определяет нагрев их обмоток (I^2r).



Фиг. 171. Треугольник мощностей

Катет, прилегающий к углу φ, представляет собой известную нам активную мощность P.

$$P = U_a I.$$

Так как $U_a = Ir$, то

$$P = I^2 r.$$

Активная мощность в цепях переменного тока расходуется на нагрев. В двигателях переменного тока бóльшая часть активной мощности превращается в механическую мощность.

Активная мощность измеряется ваттметром и выражается в ваттах (*вт*) или киловаттах (*квт*). Из треугольника мощностей имеем:

$$P = S\cos\varphi = UI\cos\varphi.$$

Активная мощность характеризует степень нагрузки первичного двигателя, вращающего генератор.

Катет, лежащий против угла φ, есть реактивная мощность Q.

$$Q = U_r I.$$

Так как $U_r = Ix$ (где x — реактивное сопротивление), то

$$Q = I^2 x.$$

Реактивная мощность обусловлена наличием магнитных и электрических полей в индуктивностях и емкостях цепей. Из треугольника мощности имеем:

$$Q = S\sin\varphi = UI\sin\varphi.$$

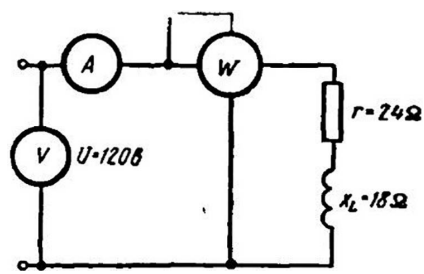
Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (*вар*) или киловольт-амперах реактивных (*квар*). Применяя к треугольнику мощностей теорему Пифагора, получим:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

или

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Рассмотрим электрическую цепь, показанную на фиг. 172, в которую входят индуктивное и активное сопротивления и измерительные приборы — амперметр, вольтметр и ваттметр. Об устройстве ваттметра будет подробно сказано ниже (глава четырнадцатая).



Фиг. 172. Электрическая цепь с активным и индуктивным сопротивлениями и измерительными приборами

1. Если подключить эту цепь к постоянному напряжению, то, поскольку индуктивное сопротивление x_L при постоянном токе будет равно нулю, в цепи остается одно активное сопротивление r и тогда

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{24} = 5\ a.$$

Амперметр покажет ток 5 *а*.

Мощность

$$P = IU = 5 \cdot 120 = 600\ вт$$

или

$$P = I^2 r = 25 \cdot 24 = 600\ вт.$$

Следовательно, ваттметр покажет 600 *вт*. Таким образом, ваттметр, включенный в цепь постоянного тока, показывает мощность в ваттах, потребляемую цепью. Показание ваттметра равно произведению показаний вольтметра и амперметра.

2. Подключим ту же цепь к переменному напряжению.

В этом случае:

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{24^2 + 18^2} = \sqrt{900} = 30 \text{ ом}.$$

Ток в цепи

$$I = \frac{U}{z} = \frac{120}{30} = 4 \text{ а}.$$

Амперметр покажет ток 4 *а*.

Подсчитаем мощность, идущую на нагрев:

$$P = I^2 r = 4^2 \cdot 24 = 384 \text{ вт}.$$

Показание ваттметра в этом случае будет 384 *вт*.

Полная мощность, забираемая цепью от источника переменного тока,

$$S = IU = 4 \cdot 120 = 480 \text{ ва}.$$

Следовательно, генератор, питающий эту цепь, отдает полную мощность $S = 480$ *ва*. Но в самой цепи только активная мощность $P = 384$ *вт* безвозвратно теряется в виде тепла.

Отсюда видно, что цепь переменного тока, содержащая наряду с активным сопротивлением индуктивное, из всей получаемой ею полной энергии только часть расходует на тепло. Остальная часть — реактивная энергия — то забирается цепью от генератора и запасается в магнитном поле катушки, то возвращается обратно генератору.

§ 99. Коэффициент мощности («косинус фи»)

Коэффициентом мощности, или «косинусом фи» ($\cos \varphi$), цепи называется отношение активной мощности к полной мощности.

$$\text{Коэффициент мощности} = \frac{\text{активная мощность } P}{\text{полная мощность } S}.$$

В общем случае активная мощность меньше полной мощности, т. е. у этой дроби числитель меньше знаменателя, и поэтому коэффициент мощности меньше единицы.

Только в случае чисто активной нагрузки, когда вся мощность является активной мощностью, числитель и знаменатель этой дроби равны между собой, и поэтому коэффициент мощности равен единице.

Реактивная энергия потребляется нагрузкой и, если не принимать специальных мер, она будет загружать линию, идущую от генератора к нагрузке. Нельзя лишить реактивной энергии

цепь, содержащую индуктивную нагрузку, но разгрузить генератор от реактивной мощности необходимо.

Чем большую часть полной мощности составляет активная мощность, тем меньше числитель отличается от знаменателя дроби и тем ближе коэффициент мощности к единице. Задача состоит в том, чтобы заставить протекать по линии к потребителю только минимально необходимую величину реактивной энергии.

Из треугольника мощностей (см. фиг. 171) получаем:

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

Cos φ, или коэффициент мощности, измеряется особым прибором фазометром, устройство которого описано в четырнадцатой главе.

Пример 16. Амперметр показывает ток 10 *а*, вольтметр — 120 *в*, ваттметр — 1 *квт*. Определить cos φ потребителя.

$$S = IU = 10 \cdot 120 = 1200 \text{ ва},$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{1000}{1200} = 0{,}83.$$

Пример 17. Определить активную мощность, отдаваемую генератором однофазного переменного тока в сеть, если вольтметр на щите генератора показывает 220 *в*, амперметр — 20 *а* и фазометр — 0,8.

$$P = IU\cos\varphi = 20 \cdot 220 \cdot 0{,}8 = 3\,520 \text{ вт} = 3{,}52 \text{ квт}.$$

Полная мощность.

$$S = IU = 20 \cdot 220 = 4\,400 \text{ ва} = 4{,}4 \text{ ква}.$$

Пример 18. Вольтметр, установленный на щитке электродвигателя, показывает 120 *в*, амперметр — 450 *а*, ваттметр — 50 *квт*. Определить *z*, *r*, x_L, *S*, cos φ, Q.

$$z = \frac{U}{I} = \frac{120}{450} = 0{,}267 \text{ ом}.$$

Так как $P = I^2 \cdot r$, то

$$r = \frac{P}{I^2} = \frac{50\,000}{450^2} = 0{,}247 \text{ ом},$$

$$x_L = \sqrt{z^2 - r^2} = \sqrt{0{,}267^2 - 0{,}247^2} = \sqrt{0{,}01} = 0{,}1 \text{ ом},$$

$$S = IU = 450 \cdot 120 = 54\,000 \text{ ва} = 54 \text{ ква},$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{50\,000}{54\,000} = 0{,}927,$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{54\,000^2 - 50\,000^2} = \sqrt{416\,000\,000} = 20\,396 \text{ вар} = 20{,}396 \text{ квар}.$$

Из построения треугольников сопротивлений, напряжений и мощностей для определенной цепи видно, что эти треугольники подобны один другому, так как их стороны пропорциональны.

Из каждого треугольника можно найти «косинус фи» цепи, как показано на фиг. 173. Этим можно воспользоваться для решения самых разнообразных задач.

Пример 19. Определить z, x_L, U, U_a, U_L, S, P, Q, если $I=6a$, $r=3$ ом, $\cos\varphi=0{,}8$ и ток отстает по фазе от напряжения.

Из треугольника сопротивлений известно, что

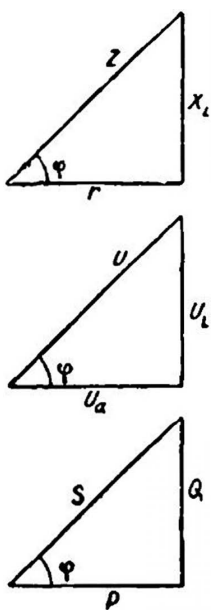
$$\cos\varphi = \frac{r}{z},$$

отсюда

$$z = \frac{r}{\cos\varphi} = \frac{3}{0{,}8} = 3{,}75 \text{ ом}.$$

$$U = I \cdot z = 6 \cdot 3{,}75 = 22{,}5 \text{ в}.$$

$$x_L = \sqrt{z^2 - r^2} = \sqrt{3{,}75^2 - 3^2} = \sqrt{14{,}06 - 9} = \sqrt{5{,}06} = 2{,}24 \text{ ом}.$$



Фиг. 173. Определение коэффициента мощности из треугольников сопротивлений, напряжений и мощностей

$$U_a = Ir = 6 \cdot 3 = 18 \text{ в}.$$

$$U_L = Ix_L = 6 \cdot 2{,}24 = 13{,}45 \text{ в}.$$

$$S = IU = 6 \cdot 22{,}5 = 135 \text{ ва}.$$

$$P = I^2 r = 36 \cdot 3 = 108 \text{ вт}$$

или

$$P = IU\cos\varphi = 6 \cdot 22{,}5 \cdot 0{,}8 = 108 \text{ вт}.$$

$$Q = IU_L = 6 \cdot 13{,}45 = 81 \text{ вар}$$

или

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{135^2 - 108^2} = \sqrt{6561} = 81 \text{ вар}.$$

или

$$Q = I^2 x_L = 6^2 \cdot 2{,}24 = 81 \text{ вар}.$$

§ 100. Необходимость увеличения «косинуса фи» потребителей

Допустим, что на электростанции установлен генератор однофазного переменного тока мощностью 240 *ква*, напряжением 1200 *в*. Ток, который может отдавать генератор в сеть,

$$I = \frac{S}{U} = \frac{240\,000}{1200} = 200 \text{ а}.$$

Разберем случай, когда к генератору присоединена нагрузка, имеющая только активное сопротивление (электронагревательные приборы, лампы накаливания). Так как в этом случае вся мощность, отдаваемая генератором, есть мощность активная, то $\cos\varphi$ равен единице.

Активная мощность генератора

$$P = IU \cos\varphi = 200 \cdot 1200 \cdot 1 = 240\,000 \text{ вт} = 240 \text{ квт}.$$

Если мы теперь к тому же генератору подключим нагрузку, имеющую $\cos\varphi = 0{,}8$ (активное и индуктивное сопротивления), то активная мощность, отдаваемая генератором в сеть,

$$P = IU \cos\varphi = 200 \cdot 1200 \cdot 0{,}8 = 192\,000 \text{ вт} = 192 \text{ квт}.$$

Генератор по активной мощности будет не загружен, хотя прежний ток 200 *а* проходит по его обмотке, нагревая ее. Увеличить ток генератора свыше 200 *а* нельзя, так как это опасно для обмоток генератора.

При нагрузке, имеющей $\cos\varphi = 0{,}5$, генератор отдает активную мощность,

$$P = IU \cos\varphi = 200 \cdot 1200 \cdot 0{,}5 = 120\,000 \text{ вт} = 120 \text{ квт}.$$

Таким образом, мы видим, что, чем меньший $\cos\varphi$ имеет потребитель, тем меньшую активную мощность будет отдавать генератор, тем менее он будет загружен по активной мощности и тем меньше будет коэффициент полезного действия машины. Это заставило учитывать не только активную энергию, забираемую потребителем от электростанции, но также и реактивную энергию. Поэтому у потребителя, имеющего реактивную нагрузку, должны быть установлены электросчетчики активной и реактивной энергии (их устройство и работа описаны в четырнадцатой главе книги). При этом активная и реактивная энергии при постоянстве активной и реактивной мощностей могут быть определены по формулам:

$$A_a = Pt \text{ квт} \cdot \text{ч};$$
$$A_p = Qt \text{ квар} \cdot \text{ч}.$$

Низкий «косинус фи» потребителя приводит:

1. К необходимости увеличения полной мощности электрических станций и трансформаторов.

Из формулы

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}$$

видно, что

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

Так, например, если мощность двигателей цеха равна 80 *квт*, а $\cos\varphi$ сети цеха равен 0,8, то мощность трансформатора для питания двигателей будет:

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{80}{0{,}8} = 100 \text{ ква}.$$

При понижении cos φ сети цеха до 0,6 при той же мощности двигателей необходимая мощность трансформатора будет уже:

$$S = \frac{80}{0.6} = 133 \text{ ква}.$$

Если в первом случае подойдет трансформатор в 100 *ква*, то во втором случае необходимо взять следующий по мощности трансформатор — в 180 *ква*.

2. К понижению коэффициента полезного действия генераторов и трансформаторов. Генератор или трансформатор, работающие на нагрузку с низким «косинусом фи», по току могут быть загружены, а по активной мощности — нет. У машины, работающей с недогрузкой, коэффициент полезного действия падает, что ведет к излишнему расходу энергии первичных двигателей (соответственно торфа или угля на тепловых электрических станциях, жидкого топлива в двигателях внутреннего сгорания и т. д.).

3. К увеличению потерь мощности и напряжения в проводах и увеличению сечения проводов. Из формулы мощности однофазного переменного тока

$$P = IU \cos \varphi$$

видно, что

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}.$$

Так, например, при мощности $P = 1$ *квт*, $\cos \varphi = 0{,}9$ и напряжении $U = 200$ *в*

$$I = \frac{1000}{200 \cdot 0{,}9} = 5{,}55 \text{ а}.$$

Но уже при $\cos \varphi = 0{,}6$

$$I = \frac{1000}{200 \cdot 0{,}6} = 8{,}35 \text{ а}.$$

Таким образом, при одних и тех же значениях мощности и напряжения уменьшение cos φ сопровождается увеличением тока в проводах и, следовательно, возрастанием потерь на нагрев (I^2r). Во избежание опасного нагрева при увеличении тока сечение провода необходимо увеличить. Кроме того, увеличение тока в проводах при неизменном их сечении приводит к увеличению падения напряжения в них.

§ 101. Причины, влияющие на величину «косинуса фи» потребителя, и меры, принимаемые для увеличения «косинуса фи»

А. Причины низкого «косинуса фи». 1. Недогрузка электродвигателей переменного тока. При недогрузке электродвигателя потребляемая им активная мощность

уменьшается пропорционально нагрузке. В то же время реактивная мощность изменяется меньше. Поэтому чем меньше нагрузка двигателя, тем с меньшим коэффициентом мощности он работает.

Так, например, асинхронный двигатель в 400 *квт* при 1000 оборотах в минуту имеет «косинус фи», равный при полной нагрузке 0,83. При $^3/_4$ нагрузки тот же двигатель имеет $\cos\varphi=0{,}8$. При $^1/_2$ нагрузки $\cos\varphi=0{,}7$ и при $^1/_4$ нагрузки $\cos\varphi=0{,}5$.

Двигатели, работающие вхолостую, имеют «косинус фи», равный от 0,1 до 0,3 в зависимости от типа, мощности и скорости вращения.

2. Неправильный выбор типа электродвигателя. Двигатели быстроходные и большой мощности имеют более высокий «косинус фи», чем тихоходные и маломощные двигатели. Двигатели закрытого типа имеют $\cos\varphi$ ниже, чем двигатели открытого типа. Двигатели, неправильно выбранные по типу, мощности и скорости, понижают $\cos\varphi$.

3. Повышение напряжения в сети. В часы малых нагрузок, обеденных перерывов и т. п. напряжение сети на предприятии увеличивается на несколько вольт. Это ведет к увеличению намагничивающего тока индуктивных потребителей (реактивной составляющей их полного тока), что в свою очередь вызывает уменьшение $\cos\varphi$ предприятия.

4. Неправильный ремонт двигателя. При перемотке электродвигателей обмотчики вследствие неправильного подбора провода иногда не заполняют пазы машины тем количеством проводников, которое было в фабричной обмотке. При работе такого двигателя, вышедшего из ремонта, увеличивается магнитный поток рассеяния, что приводит к уменьшению $\cos\varphi$ двигателя.

При сильном износе подшипников ротор двигателя может задевать при вращении за статор. Вместо того чтобы сменить подшипники, обслуживающий персонал иногда идет по неправильному и вредному пути и подвергает ротор обточке.

Увеличение воздушного зазора между ротором и статором вызывает увеличение намагничивающего тока и уменьшение $\cos\varphi$ двигателя.

Б. Способы увеличения «косинуса фи». Вышеперечисленные последствия низкого $\cos\varphi$ с достаточной убедительностью говорят о том, что необходимо вести борьбу за высокий $\cos\varphi$. К мерам увеличения $\cos\varphi$ относятся:

1. Правильный выбор типа, мощности и скорости вновь устанавливаемых двигателей.

2. Увеличение загрузки двигателей.

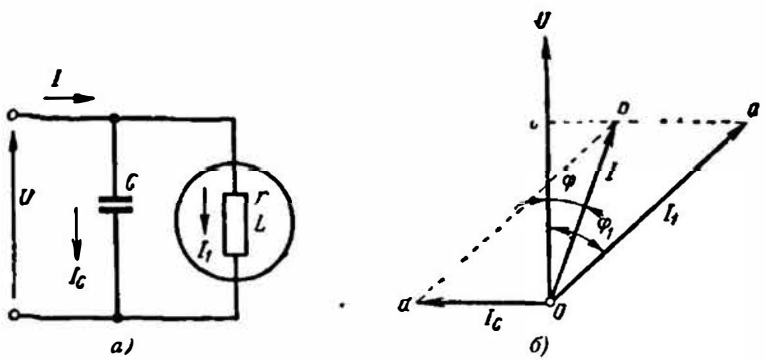
3. Недопущение работы двигателей вхолостую продолжительное время.

4. Правильный и высококачественный ремонт двигателей.

5. Применение статических (т. е. неподвижных, невращающихся) конденсаторов.

Малый вес конденсаторов, отсутствие вращающихся частей, незначительные потери энергии в них, легкость обслуживания, безопасность и надежность в работе дают возможность широкого применения статических конденсаторов для повышения $\cos\varphi$ двигателей.

Подбирая величину емкости при параллельном соединении индуктивности и емкости, можно добиться уменьшения угла



Фиг. 174. Увеличение $\cos\varphi$ при помощи статических конденсаторов: *а* — схема включения, *б* — векторная диаграмма

сдвига фаз между напряжением и общим током при неизменной активной и реактивной мощности, потребляемой ветвью с индуктивностью. Этот угол можно сделать равным нулю. Тогда ток, текущий на общем участке цепи, будет иметь наименьшую величину и совпадать по фазе с напряжением сети.

Это явление называется компенсацией сдвига фаз и широко используется на практике.

По экономическим соображениям невыгодно доводить угол φ до нуля, практически целесообразно иметь $\cos\varphi=0{,}9—0{,}95$.

Рассмотрим расчет емкости конденсаторов, которые нужно включить параллельно индуктивной нагрузке, чтобы повысить $\cos\varphi$ до заданной величины.

На фиг. 174, *а* изображена схема включения индуктивной нагрузки в сеть переменного тока. Для увеличения коэффициента мощности параллельно потребителю включена батарея конденсаторов. Векторная диаграмма начинается с построения вектора напряжения U. Ток I_1 вследствие индуктивного характера нагрузки отстает по фазе от напряжения сети на угол φ_1.

Необходимо умеиьшить угол сдвига фаз между напряжением U и общим током до величины φ*.

Отрезок oc, представляющий активную слагающую тока I_1, равен:

$$oc = I_1 \cos\varphi_1 = oa \cos\varphi_1.$$

Пользуясь выражением мощности переменного тока

$$P = UI \cos\varphi,$$

отрезок oc выразим так:

$$oc = I_1 \cos\varphi_1 = \frac{P}{U}.$$

Ток на общем участке цепи I равен геометрической сумме тока нагрузки I_1 и тока конденсатора I_C.

Из треугольника oac и obc имеем:

$$ac = oc \operatorname{tg}\varphi_1;$$
$$bc = oc \operatorname{tg}\varphi.$$

Из диаграммы получаем:

$$ab = od = ac - bc = oc \operatorname{tg}\varphi_1 - oc \operatorname{tg}\varphi = oc(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi).$$

Так как $oc = \frac{P}{U}$ и $ab = I_C$, то

$$I_C = \frac{P}{U}(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi).$$

Вместе с этим, как было указано выше,

$$I_C = U\omega C.$$

Следовательно, $C = \frac{P}{\omega U^2}(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi)$.

Пример 20. Электрические двигатели шахты потребляют мощность 2000 *квт* при напряжении 6 *кв* и $\cos\varphi_1 = 0{,}6$. Требуется найти емкость конденсаторов, которую нужно подключить на шины установки, чтобы увеличить $\cos\varphi$ до 0,9 при $f = 50$ *гц*.

Решение.

$$\cos\varphi_1 = 0{,}6;\ \varphi_1 = 53°10';\ \operatorname{tg}\varphi_1 = 1{,}335;$$
$$\cos\varphi = 0{,}9;\ \varphi = 25°50';\ \operatorname{tg}\varphi = 0{,}484;$$
$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314 \frac{1}{сек};$$
$$C = \frac{P}{\omega U^2}(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi) = \frac{2\,000\,000}{314 \cdot 6000^2}(1{,}335 - 0{,}484) = 0{,}00015\ ф = 150\ мкф.$$

---

* Иначе говоря, увеличить коэффициент мощности от значения $\cos\varphi_1$ до значения $\cos\varphi$.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определить частоту переменного тока, получаемого от генератора с 24 полюсами, при 250 оборотах ротора в минуту.

2. Двадцатиполюсный генератор переменного тока дает ток частоты 50 *гц*. Определить число оборотов ротора генератора в минуту.

3. Определить число полюсов генератора переменного тока, если скорость вращения ротора генератора равна 300 *об/мин*, а частота — 50 *гц*.

4. Катушка включена в сеть однофазного переменного тока напряжением 120 *в*; э. д. с. самоиндукции равна 100 *в*. Чему равно активное падение напряжения?

5. Что покажет вольтметр, включенный на зажимы обмотки электромагнита, если индуктивное сопротивление обмотки равно 6 *ом*, активное сопротивление — 8 *ом*, а ток, протекающий по виткам обмотки, равен 5 *а*?

6. Когда катушку включили в сеть постоянного тока напряжением 120 *в*, амперметр показал ток 4 *а*; когда ту же катушку включили в сеть переменного тока напряжением 380 *в*, амперметр показал 5 *а*. Определить полное, активное и индуктивное сопротивления катушки.

7. Два проводника с активным сопротивлением 6 и 5 *ом* и индуктивным сопротивлением 3 и 8 *ом* включены последовательно. Какое напряжение нужно приложить, чтобы в цепи проходил ток 4 *а*?

8. По проводнику с активным сопротивлением 7 *ом* и индуктивным сопротивлением 5 *ом* проходит ток 6 *а*. Параллельно первому проводнику включен второй проводник с сопротивлением $r=2$ *ом* и $x_L=4$ *ом*. Определить ток во втором проводнике.

9. Однофазный электродвигатель, включенный в сеть 120 *в*, потребляет ток 2 *а*. Коэффициент мощности двигателя 0,85. Определить активную и полную мощности, забираемые двигателем из сети.

10. На распределительном щите установлены три прибора: амперметр, вольтметр и ваттметр. Показание амперметра — 40 *а*, вольтметра — 110 *в*, ваттметра — 4 *квт*. Определить z, r, x_L S, $\cos\varphi$, Q, U_L, U_a, если известно, что нагрузка имеет индуктивный характер.

11. Определить ток, потребляемый однофазным двигателем мощностью 5 *квт*, если он включен в сеть 120 *в*, а его коэффициент мощности равен 0,8.

12. На электростанции установлен генератор однофазного переменного тока мощностью 200 *ква*, напряжением 100 *в*. Определить активную мощность, отдаваемую генератором в сеть, при коэффициентах мощности 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2.

13. Через индукционную катушку с $\cos\varphi=0{,}3$ пропустили переменный ток в 10 *а*. Ваттметр, измеряющий мощность катушки, показал 250 *вт*. Определить напряжение на зажимах катушки, ее полное, активное и индуктивное сопротивления.

14. Индуктивная катушка включена в сеть постоянного тока напряжением 12 *в* и потребляет ток 8 *а*. Тот же ток катушка потребляет при включении в сеть переменного тока напряжением 20 *в*. Определить активное, индуктивное и полное сопротивления катушки; полную, активную и реактивную мощности.

15. Показания приборов равны: амперметра — 20 *а*, вольтметра — 120 *в*, фазометра — 0,8. Определить S, p, Q, z, r, x_L, U_L, U_a.

16. Полезная мощность на валу однофазного двигателя 10 *л. с.*, к. п. д. двигателя 85%, $\cos\varphi=0{,}8$, напряжение 220 *в*. Определить мощность генератора, питающего этот двигатель, если энергия передается по линии длиной 50 *м*, выполненной медным проводом сечением 16 *мм*^{2}. Индуктивным сопротивлением проводов линии можно пренебречь.

17. Показания приборов равны: амперметра — 8 *а*, вольтметра — 220 *в*; активное сопротивление катушки равно 15 *ом*. Определить P, S, Q, z, x_L, $\cos\varphi$, U_L, U_a потребителя.

18. На паспорте однофазного двигателя написано: $U=120$ *в*, $I=5$ *а*, $\cos\varphi=0{,}8$. Определить активное, индуктивное и полное сопротивления обмотки двигателя.

19. В сеть однофазного тока включена катушка с сердечником из мягкой стали. В цепь катушки включены приборы: вольтметр, амперметр и ваттметр. Показание амперметра 5 *а*, вольтметра 120 *в* и ваттметра 200 *вт*. Активное сопротивление катушки 2 *ом*. Определить коэффициент мощности катушки, величину э. д. с. самоиндукции, потерю мощности в обмотке катушки, а также в сердечнике.

20. Дроссельная катушка (т. е. катушка со стальным сердечником) с коэффициентом мощности 0,2, включенная в сеть 60 *в*, потребляет ток 3 *а*. Активное сопротивление катушки 2 *ом*. Определить величину э. д. с., индуктируемой в катушке, потерю мощности в обмотке и в сердечнике.

Контрольные вопросы

1. Как получается переменный ток?
2. Что называется периодом и частотой переменного тока?
3. Как определить частоту, если известно число полюсов и скорость вращения ротора генератора переменного тока?
4. Какие действия производит переменный ток?
5. В чем выражается действие индуктивности, включенной в цепь переменного тока?
6. Что называется активным и индуктивным сопротивлениями?
7. Что называется коэффициентом мощности?
8. Как измерить активную и полную мощности переменного тока?
9. Как проявляет себя емкость, включенная в цепь переменного тока?
10. Какие меры принимаются для улучшения «косинуса фи»?
11. Что называется действующим значением переменного тока?
12. Что называется резонансом напряжений?
13. Что называется резонансом токов?

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ТРЕХФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

§ 102. Многофазные токи

Многофазной системой называется совокупность переменных э. д. с. (токов, напряжений и т. д.) одной частоты и сдвинутых по фазе одна относительно другой на какие-либо углы. Если амплитуды отдельных э. д. с. равны и э. д. с. сдвинуты по фазе друг относительно друга на углы, равные $\frac{2\pi}{m}$ (где m — число фаз), то такая система называется симметричной многофазной системой.

Каждая э. д. с. может действовать в своей самостоятельной цепи и не быть связанной с другими э. д. с. Такая система называется несвязанной.

Однофазная цепь, входящая в состав данной многофазной цепи, называется фазой. Отдельные фазы несвязанной системы электрически и магнитно не связаны между собой, в работе не зависят одна от другой и их можно рассчитывать по формулам расчета цепей однофазного тока.

Недостатком несвязанной многофазной системы является большое число проводов, равное $2m$. Так, например, для передачи энергии по трехфазной системе потребуется шесть проводов.

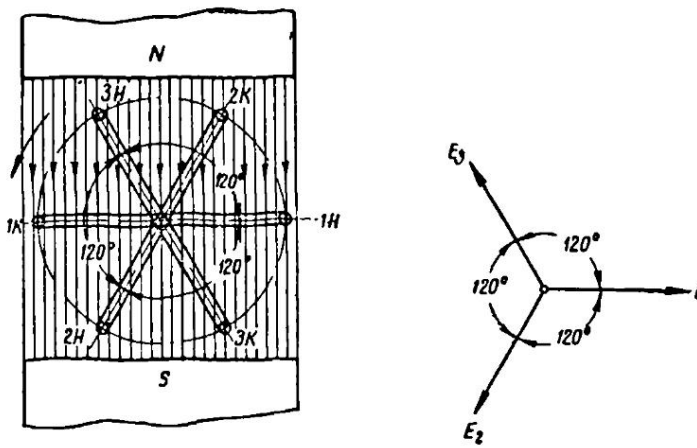
Многофазная система, у которой отдельные фазы электрически соединены одна с другой, называется связанной многофазной системой. Связанные системы широко применяются на практике.

Многофазный ток обладает важными преимуществами: во-первых, при передаче одной и той же мощности многофазным током требуется меньшее сечение проводов, чем при однофазном токе; во-вторых, с помощью неподвижных катушек или обмоток он создает вращающееся магнитное поле, используемое в работе двигателей и различных приборов переменного тока.

§ 103. Трехфазный переменный ток

Из систем многофазного тока наибольшее применение на практике получил трехфазный переменный ток.

Трехфазный переменный ток получается следующим образом. Если в однородном магнитном поле полюсов NS (фиг. 175) поместить три витка, расположив каждый из них по отношению к другому под углом 120°, и вращать витки с постоянной угловой скоростью, то в витках будут индуктироваться э. д. с., которые



Фиг. 175. Вращение витков в однородном магнитном поле

также будут сдвинуты по фазе на 120°. Если принять начальную фазу первого витка, равной нулю, то э. д. с. в витках выразятся следующими уравнениями:

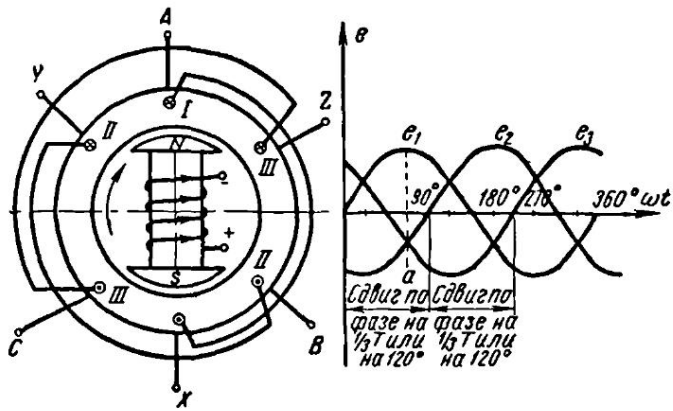
$$e_1 = E_{m1} \sin \omega t;$$
$$e_2 = E_{m2} \sin (\omega t - 120°);$$
$$e_3 = E_{m3} \sin (\omega t - 240°).$$

Справа на фиг. 175 показана векторная диаграмма э. д. с. трех витков. Как было сказано выше, длина векторов равна действующему значению э. д. с. На практике для получения трехфазного тока на статоре генератора переменного тока делают три обмотки, сдвинутые одна относительно другой на 120°. Они называются фазными обмотками или просто фазами генератора.

На фиг. 176 слева схематически показан двухполюсный генератор трехфазного тока. На статоре машины имеются три обмотки с одинаковым числом витков, сдвинутые на 120° (для двухполюсной машины). Буквами A, B и C отмечены начала; бук-

вами X, Y и Z — концы обмоток. Магнитное поле создается обмоткой, имеющейся на роторе. Через щетки и кольца к концам этой обмотки подается постоянное напряжение от специального генератора постоянного тока или от выпрямителя. Ротор генератора при помощи первичного двигателя (паровой турбины, гидротурбины, двигателя внутреннего сгорания и т. п.) приводится во вращение; его магнитное поле пересекает обмотки статора и в них индуктируются синусоидальные э. д. с.

Справа на той же фигуре показаны кривые изменения индуктированных э. д. с. во всех трех обмотках. Положение, в кото-



Фиг. 176. Получение трехфазного переменного тока

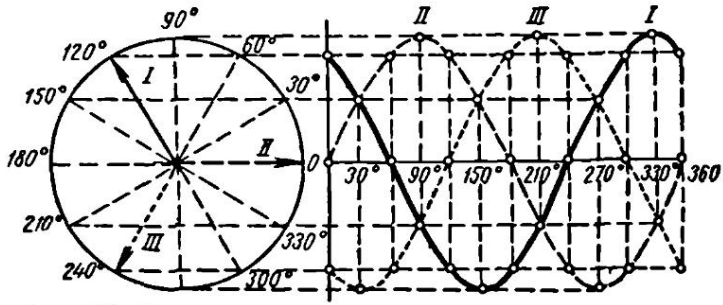
ром показан ротор на левой части фигуры, отмечено на правой части пунктиром ae_1. В этот момент катушка I находится над серединами полюсов электромагнита, величина индуктированной э. д. с. в ней имеет максимальное значение и направлена согласно правилу правой руки от конца катушки к ее началу. Э. д. с. в катушке II отстает по фазе от э. д. с. в катушке I на $^1/_3$ периода и э. д. с. в катушке III отстает от э. д. с. в катушке II также на $^1/_3$ периода.

Катушки II и III находятся в зоне действия южного полюса электромагнита ротора, поэтому индуктированные э. д. с. в этих катушках направлены от их начала к концу.

Три такие же синусонды, как показано на фиг. 176, можно получить путем вращения трех векторов, изображающих в масштабе максимальную величину э. д. с. в катушках статора генератора и сдвинутых один относительно другого на 120° (фиг. 177).

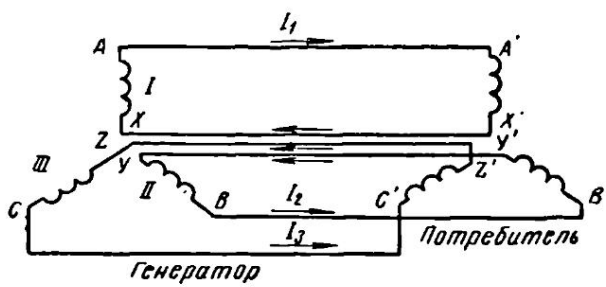
Все сказанное выше об электродвижущих силах относится также к токам и напряжениям. В соответствии с данным выше общим определением отметим, что система трех переменных

э. д. с. одной частоты и одинаковой амплитуды, сдвинутых по фазе одна относительно другой на $120^\circ \left(\frac{2\pi}{3}\right)$, называется трехфазной симметричной системой.



Фиг. 177. Построение трех синусоид, сдвинутых по фазе на 120°, путем вращения трех векторов, расположенных под углом 120°

Обмотки фаз генератора имеют одинаковое число витков и делаются из провода одного сечения. Э. д. с., индуктированные в этих обмотках, будут равны по величине. Если каждая из трех фаз генератора будет работать на отдельную нагрузку (фиг. 178),



Фиг. 178. Шестипроводная система трехфазного тока

то мы будем иметь несвязанную трехфазиую систему. В этом случае генератор связан с потребителем шестью проводами. Ток, протекающий в фазе, согласно закону Ома, равен:

$$I_\Phi = \frac{U_\Phi}{z_\Phi},$$

где I_Φ — фазный ток;
U_Φ — напряжение фазной обмотки генератора;
z_Φ — полное сопротивление фазы потребителя.

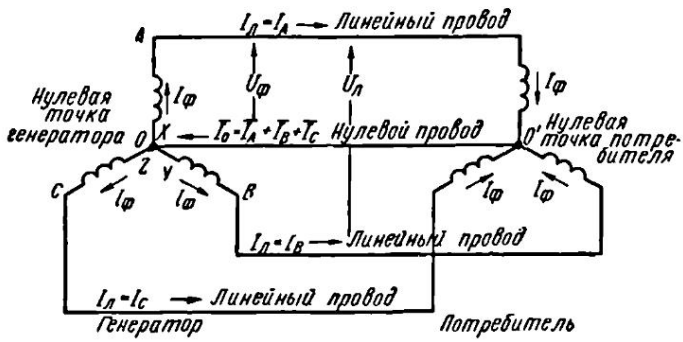
Несвязанная система трехфазного тока на практике не применяется.

Фазные обмотки генераторов и потребителей трехфазного тока (двигатели, трансформаторы и др.) соединяются по схеме звездой или треугольником.

Нужно отметить, что русский инженер М. О. Доливо-Добровольский своими работами (1888 г.) способствовал быстрому внедрению трехфазного тока и широкому распространению его на практике.

§ 104. Соединение звездой

Если фазные обмотки генератора или потребителя соединить так, чтобы концы обмоток были замкнуты в одну общую точку, а начала обмоток подключены к линейным проводам, то такое соединение называется соединением звездой и обозначается условным знаком λ. На фиг. 179 обмотки генератора и потреби-



Фиг. 179. Четырехпроводная система трехфазного тока

теля соединены звездой. Точки, в которых соединены концы фазных обмоток генератора или потребителя, называются соответственно нулевыми точками генератора (0) и потребителя (0′). Обе точки 0 и 0′ соединены проводом, который называется нулевым или нейтральным проводом. Остальные три провода трехфазной системы, идущие от генератора к потребителю, называются линейными проводами. Таким образом, генератор соединен с потребителем четырьмя проводами. Поэтому эта система называется четырехпроводной системой трехфазного тока.

Сравнивая несвязанную (фиг. 178) и четырехпроводную (фиг. 179) системы трехфазного тока, видим, что в первом случае роль обратного провода выполняют три провода системы, а во втором — один нулевой провод. При работе по нулевому проводу протекает ток, равный геометрической сумме трех токов: I_A, I_B и I_C, т. е. $\overline{I}_0 = \overline{I}_A + \overline{I}_B + \overline{I}_C$.

Напряжения, измеренные между началами фаз генератора или потребителя и нулевой точкой или нулевым проводом, называются **фазными напряжениями** и обозначаются U_A, U_B, U_C или в общем виде U_Φ. Часто задаются величины э. д. с. фазных обмоток генератора. Они обозначаются E_A, E_B, E_C или E_Φ. Если пренебречь сопротивлениями обмоток генератора, то можно записать:

$$E_A = U_A;\ E_B = U_B;\ E_C = U_C;\ E_\Phi = U_\Phi.$$

Напряжения, измеренные между началами фаз A и B, B и C, C и A генератора или потребителя, называются **линейными напряжениями** и обозначаются U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} или в общем виде $U_л$. Стрелки, поставленные на фиг. 179, показывают выбранное положительное направление тока, которое в линейных проводах принято от генератора к потребителю, а в нулевом проводе — от потребителя к генератору.

Если присоединить зажимы вольтметра к точкам A и B, то он покажет линейное напряжение U_{AB}. Так как положительные направления фазных напряжений U_A, U_B и U_C выбраны от начал фазных обмоток к их концам, то вектор линейного напряжения U_{AB} будет равен геометрической разности векторов фазных напряжений U_A и U_B:

$$\overline{U}_{AB} = \overline{U}_A - \overline{U}_B.$$

Аналогично можно записать:

$$\overline{U}_{BC} = \overline{U}_B - \overline{U}_C;$$
$$\overline{U}_{CA} = \overline{U}_C - \overline{U}_A.$$

Иначе можно сказать, что мгновенное значение линейного напряжения равно разности мгновенных значений соответствующих фазных напряжений. На фиг. 180 вычитание векторов заменено сложением векторов:

$$U_A \text{ и } -U_B;\ U_B \text{ и } -U_C;\ U_C \text{ и } -U_A.$$

Из векторной диаграммы видно, что векторы линейных напряжений составляют замкнутый треугольник.

Зависимость между линейным и фазным напряжениями показана на фиг. 181:

$$U_{BC} = 2U_B \cos 30°,$$

так как

$$\cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2},$$ то

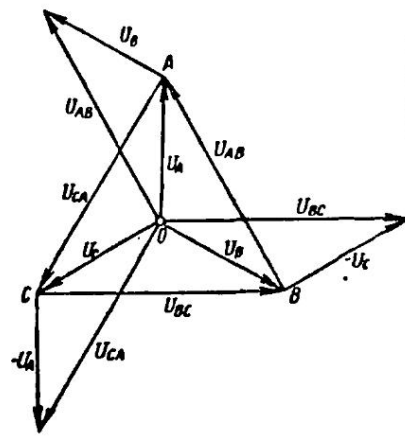
$$U_{BC} = \sqrt{3} U_B$$

или вообще

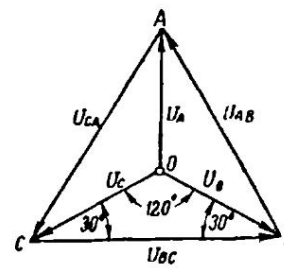
$$U_л = \sqrt{3} U_ф.$$

Следовательно, при соединении звездой линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше фазного напряжения.

В дальнейшем, говоря о напряжении в цепях трехфазного переменного тока, если не будет сделано оговорок, будем иметь в виду линейное напряжение.



Фиг. 180. Фазные и линейные напряжения при соединении звездой



Фиг. 181. Зависимость между фазными и линейными напряжениями при соединении звездой

Ток, протекающий по фазной обмотке генератора или потребителя, называется фазным током и обозначается в общем виде $I_ф$. Ток, протекающий по линейному проводу, называется линейным током и обозначается в общем виде $I_л$.

Из фиг. 179 видно, что при соединении звездой линейный ток равен фазному току, т. е. $I_л = I_ф$.

Рассмотрим случай, когда нагрузка в фазах потребителя одинакова как по величине, так и по характеру. Такая нагрузка называется равномерной или симметричной. Это условие выражается равенством:

$$z_1 = z_2 = z_3.$$

Нагрузка не будет равномерной, если $z_1 = r_1 = 5$ *ом*; $z_2 = \omega L_2 = 5$ *ом* и $z_3 = \frac{1}{\omega C_3} = 5$ *ом*, так как здесь выполнено лишь

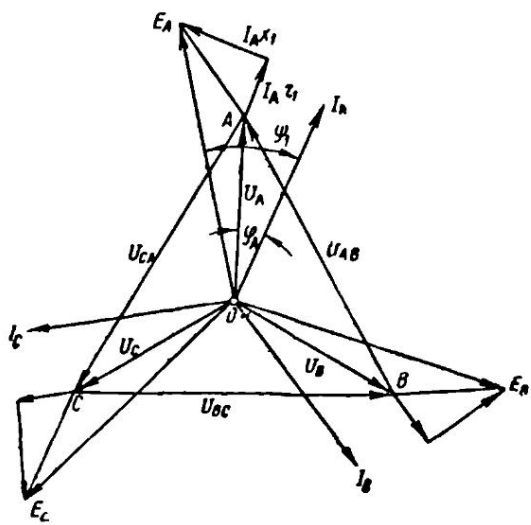
одно условие — равенство сопротивлений фаз потребителя по величине, в то время как характер сопротивлений различен (r_1 — активное сопротивление, $x_2 = \omega L_2$ — индуктивное сопротивление, $x_3 = \frac{1}{\omega C_3}$ — емкостное сопротивление).

$$I_A = \frac{U_A}{z_A}\ ;\quad I_B = \frac{U_B}{z_B},\quad I_C = \frac{U_C}{z_C}\ ;$$
$$I_A = I_B = I_C.$$

Фазные коэффициенты мощности вследствие равенства сопротивлений и одинаковостн их характера будут одинаковы:

$$\cos\varphi_1 = \frac{r_A}{z_A}\ ;\quad \cos\varphi_2 = \frac{r_B}{z_B}\ ;\quad \cos\varphi_3 = \frac{r_C}{z_C}\ ;$$
$$\cos\varphi_1 = \cos\varphi_2 = \cos\varphi_3.$$

Если предположить, что сопротивления проводов, соединяющих генератор с потребителем (линейных проводов), равны нулю, то напряженне иа зажимах потребителя будет равно напря-



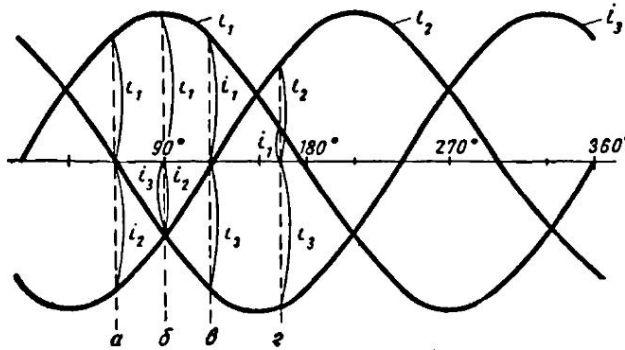
Фиг. 182. Векторная диаграмма токов и напряжеиий при соединеиии звездой

жению на зажимах генератора. Прибавляя к напряжению генератора падение напряжения в его фазных обмотках, получим фазные э. д. с. генератора.

На фиг. 182 дана векторная диаграмма токов, напряжений и э. д. с. при соединении звездой.

Нам известно уже, что в нулевом проводе должна протекать геометрическая сумма токов всех трех фаз. На фиг. 183 даны кривые изменения токов при равномерной нагрузке трехфазной системы. Так как нагрузка равномерна, то максимальные значения для всех трех синусоид тока одинаковы.

Возьмем момент *а* и, чтобы получить ток в нулевом проводе, сложим мгновеиные значения токов всех трех фаз. В этот момент ток третьей фазы i_3 равен нулю. Мгновенное значение тока в первой фазе равно i_1, причем этот ток направлен в одну сторону. Одновременно ток во второй фазе равен i_2, но этот ток направлен уже в другую сторону. Так как ток i_1 равен току i_2, но оба они имеют противоположные направления, а ток i_3 равен нулю, то сумма всех токов также равна нулю.



Фиг. 183. Определение тока в нулевом проводе при равномерной нагрузке во всех трех фазах потребителя

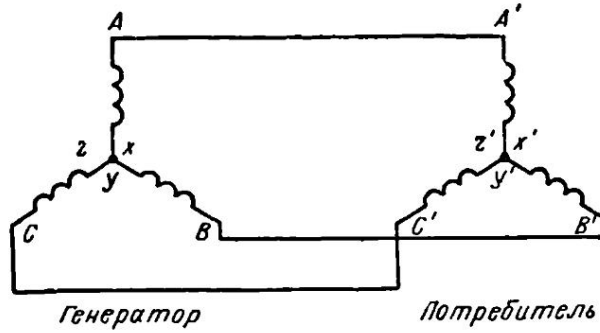
Сумма трех токов будет равна нулю в момент *в*.

В момент *б* ток первой фазы имеет максимальное положительное значение i_1. В то же время токи второй и третьей фаз i_2 и i_3, которые равны между собой, имея отрицательное направление, в сумме равны току i_1. Поэтому сумма трех токов снова равна нулю.

При рассмотрении любых других моментов мы также увидим, что при равномерной нагрузке сумма мгновениых значений токов трехфазной системы равна нулю. Следовательно, ток в нулевом проводе будет равен нулю. Отбрасывая нулевой провод в четырехпроводной системе, переходим к трехпроводной системе трехфазного тока, которая представлена схематически на фиг. 184. Таким образом, если имеем равномерную нагрузку, как, например, трехфазные двигатели переменного тока, трехфазные печи и т. п., то к такой нагрузке подводятся только три провода.

Потребители, включеиные звездой с неравномерной нагрузкой фаз, нуждаются в нулевом проводе. К таким потребителям,

как, например, при осветительной нагрузке, подводятся четыре провода.



Фиг. 184. Трехпроводная система трехфазного тока

Пример 1. Имеется потребитель, сопротивления фаз которого равны: $z_A = 5$ *ом*, $z_B = 10$ *ом*, $z_C = 20$ *ом*. Потребитель соединен звездой и включен в сеть напряжением 380 *в*. Определить ток в нулевом проводе, если коэффициенты мощности фаз одинаковы, характер нагрузки по фазам также одинаков.

Решение.

Определяем фазные токи:

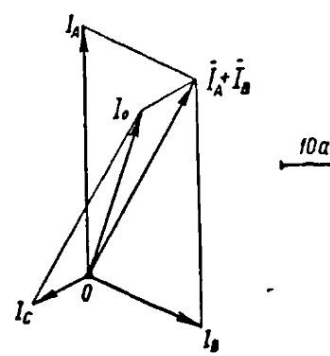
$$I_A = \frac{U_A}{z_A} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 5} = \frac{220}{5} = 44 \text{ а};$$

$$I_B = \frac{U_B}{z_B} = \frac{220}{10} = 22 \text{ а};$$

$$I_C = \frac{U_C}{z_C} = \frac{220}{20} = 11 \text{ а}.$$

Так как токи сдвинуты по фазе на 120°, то для построения векторной диаграммы проводим из одной точки три направления под углом 120° (фиг. 185). По этим направлениям в выбранном масштабе откладываем величины токов I_A, I_B, I_C.

Складывая геометрически фазные токи, находим ток в нулевом проводе I_0. В нашем случае этот ток получился равным 31 *а*.



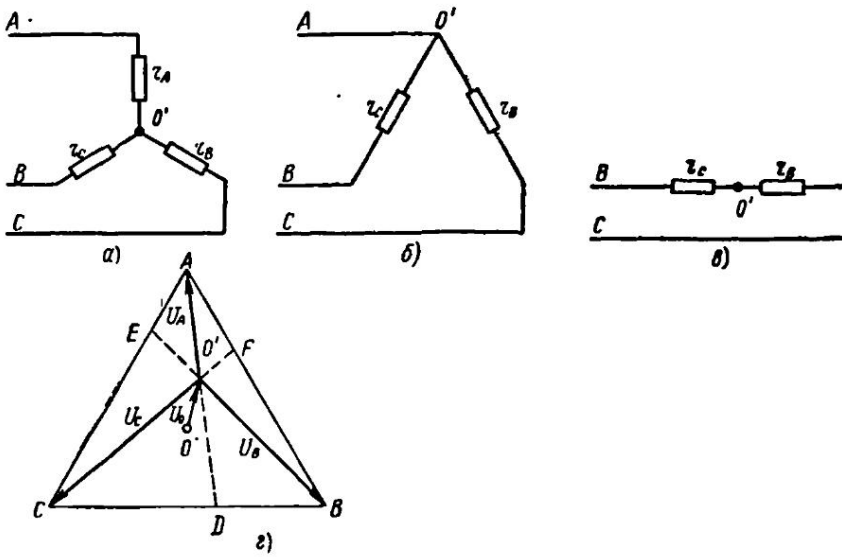
Фиг. 185. Определение тока в нулевом проводе геометрическим способом

Векторы э. д. с. обмоток генератора представляют собой симметричную систему: они равны по величине и сдвинуты один относительно другого по фазе на 120°.

Нулевая точка генератора на векторной диаграмме располагается в центре звезды фазных э. д. с. Нулевая точка потребителя, соединенного звездой при равномерной нагрузке, а также при неравномерной нагрузке, но при наличии нулевого провода,

с достаточно малым сопротивлением находится в центре тяжести треугольника линейных напряжений. Обрыв нулевого провода во время работы трехфазного потребителя с неравномерной нагрузкой фаз влечет за собой перераспределение токов и напряжений. На этом вопросе остановимся подробнее.

Пусть имеется трехфазный потребитель (фиг. 186, *а*) с неравномерной активной нагрузкой фаз. Примем отношение сопротивлений фаз потребителя равным $r_A : r_B : r_C = 1 : 2 : 3$. Требуется определить положение нулевой точки потребителя.



Фиг. 186. Определение положения нулевой точки потребителя

При замыкании фазы A накоротко (фиг. 186, *б*) ($r_A = 0$) нулевая точка $0'$ совместится с точкой A векторной диаграммы. При этом напряжение на остальных двух фазах B и C увеличивается в $\sqrt{3}$ раз, так как они окажутся включенными между линейными проводами. При обрыве фазы A ($r_A = \infty$) сопротивления фаз r_B и r_C будут включены последовательно между линейными проводами B и C (фиг. 186, *в*). Нулевая точка потребителя будет находиться на стороне BC треугольника линейных напряжений в точке D, делящей сторону BC в отношении $r_B : r_C = 2 : 3$. Можно доказать, что при изменении сопротивления фазы A от $r_A = 0$ до $r = \infty$ нулевая точка потребителя будет перемещаться по линии, соединяющей точки A и D.

Если произвести аналогичные рассуждения для фазы B, а затем для фазы C, то мы получим еще две линии: одну — BE, полученную в результате короткого замыкания и обрыва фа-

зы B, другую — CF, полученную в результате короткого замыкания и обрыва фазы C. Линия BE делит сторону AC треугольника в отношении $r_A : r_C = 1 : 3$. Линия CF делит сторону AB треугольника в отношении $r_A : r_B = 1 : 2$.

Точка пересечения прямых линий AD, BE и CF является нулевой точкой потребителя O' при данной нагрузке (фиг. 186, $г$).

Совершенно очевидно, что для определения положения нулевой точки достаточно рассмотреть случаи короткого замыкания и обрыва любых двух фаз.

Векторы $\overline{O'A}$, $\overline{O'B}$, $\overline{O'C}$ представляют собой напряжения на фазах потребителя. Как видно из диаграммы, при неравномерной нагрузке фазные напряжения потребителя различны по величине, причем величина фазного напряжения пропорциональна сопротивлению фазы.

Смещение нулевой точки потребителя, происходящее в результате неравномерной нагрузки, приводит к нежелательному явлению в осветительных сетях. Чем больше будет число и мощность ламп, включенных в фазе, тем меньше будет их сопротивление, тем меньше будет их фазное напряжение, тем слабее они будут гореть.

Нулевая точка звезды потребителя может находиться внутри треугольника линейных напряжений, совпадать с одной из его вершин, лежать на одной из его сторон и в некоторых случаях может находиться вне треугольника.

Между нулевыми точками генератора и потребителя при неравномерной нагрузке существует разность потенциалов $OO' = U_0$ (напряжение смещения нейтрали).

Мы рассмотрели явления, происходящие при неравномерной нагрузке фаз потребителя, включенного звездой без нулевого провода. С устройством нулевого провода отпадают все недостатки, вызванные неравномерной нагрузкой фаз. Осветительная нагрузка, включенная звездой, всегда требует наличия нулевого провода, так как даже равномерная нагрузка фаз в какой-то момент времени не гарантирует ее постоянства на продолжительное время.

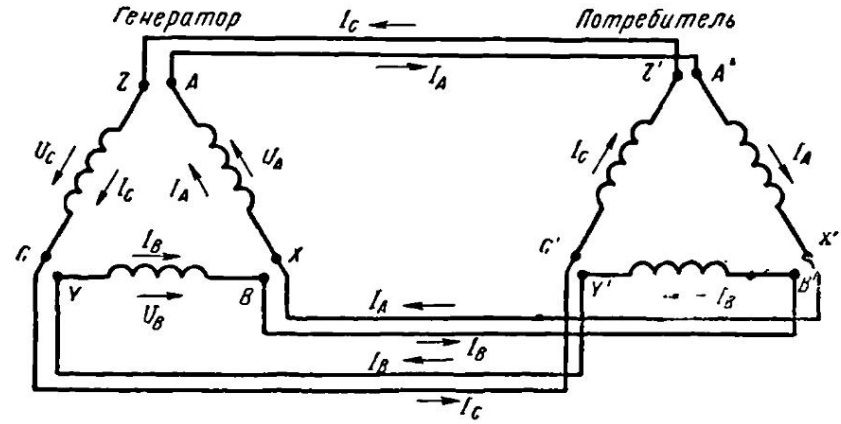
§ 105. Соединение треугольником

Кроме соединения звездой, генераторы или потребители трехфазного тока могут включаться треугольником.

На фиг. 187 представлена несвязанная трехфазная система. Объединяя попарно провода несвязанной шестипроводной системы и соединяя фазы, переходим к трехфазной трехпроводной системе, соединенной треугольником.

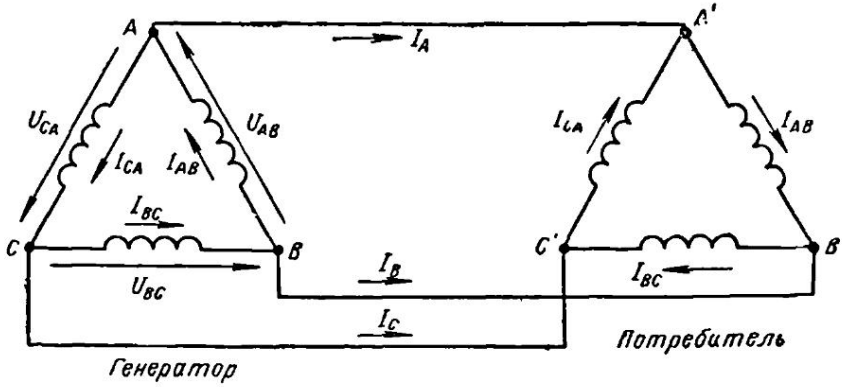
Как видно из фиг. 188, соединение треугольником выполняется таким образом, чтобы конец фазы A был соединен с началом фазы B, конец фазы B соединен с началом фазы C и конец

фазы C соединен с началом фазы A. К местам соединения фаз подключаются линейные провода.



Фиг. 187. Несвязанная трехфазная система

Если обмотки генератора соединены треугольником, то, как видно из фиг. 188, линейное напряженне создает каждая фазная обмотка. У потребителя, соединенного треугольником, лннейное



Фиг. 188. Связанная трехфазная система, соединенная треугольником

напряжение подключается к зажимам фазного сопротивления. Следовательно, при соединении треугольнником фазное напряжение равно линнейному:

$$U_л = U_ф.$$

Определим завнсимость между фазными и линейными токами при соединении треугольником, если нагрузка фаз будет одинакова по величнне и характеру. Составляем уравнения то-

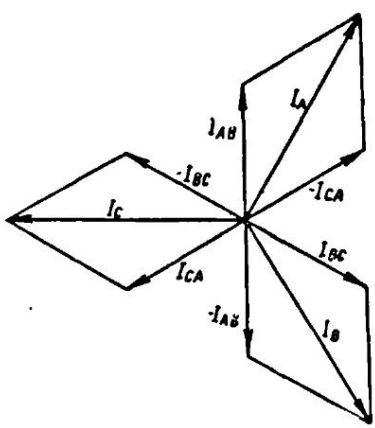
ков по первому закону Кирхгофа для трех узловых точек A', B' и C' потребнтеля:

$$\overline{I}_A + \overline{I}_{CA} = \overline{I}_{AB};$$
$$\overline{I}_B + \overline{I}_{AB} = \overline{I}_{BC};$$
$$\overline{I}_C + \overline{I}_{BC} = \overline{I}_{CA};$$

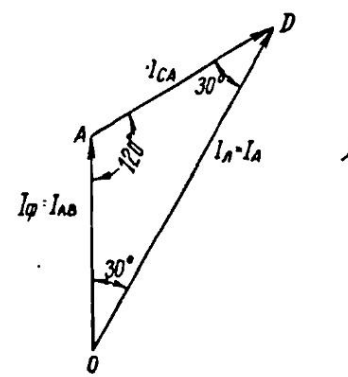
откуда

$$\overline{I}_A = \overline{I}_{AB} - \overline{I}_{CA};$$
$$\overline{I}_B = \overline{I}_{BC} - \overline{I}_{AB};$$
$$\overline{I}_C = \overline{I}_{CA} - \overline{I}_{BC}.$$

Отсюда видно, что линейные токи равны геометрической разности фазных токов. При равномерной нагрузке фазные токи одинаковы по велнчнне и сдвинуты один относительно другого на



Фиг. 189. Фазные и линейные токи при соединении треугольником



Фиг. 190. Зависимость между фазными и линейными токами при соединении треугольником

120°. Пронзводя вычитание векторов фазных токов согласно полученным уравнениям, получаем линейные токи (фиг. 189). Зависимость между фазными и линейными токами при соединении в треугольнпк показана на фиг. 190.

$$I_л = 2I_ф \cos 30°.$$

Так как

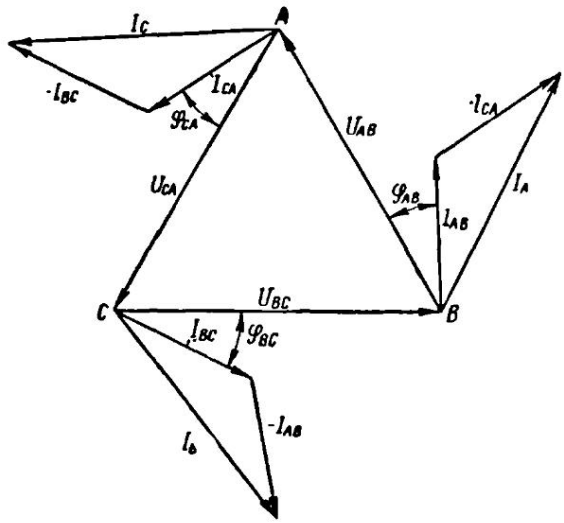
$$\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

то

$$I_л = 2I_ф \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}\ I_ф.$$

Следовательно, при равномерной нагрузке, соединенной треугольником, линейный ток в $\sqrt{3}$ раз больше фазного тока.

На фиг. 191 дана векторная диаграмма токов и напряжений при равномерной активно индуктивной нагрузке, соединенной треугольником. Построение диаграммы производится следующим образом. В выбранном масштабе строим равносторонний



Фиг. 191. Векторная диаграмма токов и напряжений при равномерной нагрузке, соединенной треугольником

треугольник линейных напряжений сети U_{AB}, U_{BC}, и U_{AC}, которые равны фазным напряжениям потребителя. В сторону отставания под углами φ_{AB}, φ_{BC}, φ_{CA} к линейным напряжениям U_{AB}, U_{BC} и U_{CA} строим в масштабе векторы фазных токов I_{AB}, I_{BC} и I_{CA}. Затем, как было указано раньше, определяем линейные токи I_A, I_B и I_C.

Пример 2. Линейное напряжение, подводимое к трехфазному электродвигателю, равно 220 *в*. Обмотка двигателя имеет полное сопротивление z, равное 10 *ом*. Определить токи в линейных проводах и в обмотке двигателя, если последняя соединена треугольником (фиг. 192, *а*).

По закону Ома

$$I_ф = \frac{U_ф}{z}.$$

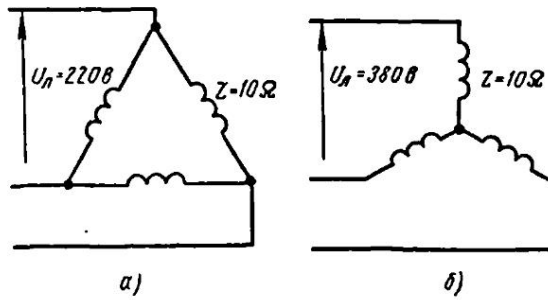
Так как при соединении треугольником $U_л = U_ф$, то

$$I_ф = \frac{220}{10} = 22\ а.$$

Изоляция фазы двигателя рассчитана на напряжение 220 *в*, а сечение фазной обмотки рассчитано по нагреву на ток 22 *а*.

При соединении треугольником $I_л = I_ф \sqrt{3}$, значит, $I_л = 22 \sqrt{3} = 22 \cdot 1{,}73 = 38\ а$.

Тот же двигатель можно включить и на линейное напряжение 380 *в*, переключив обмотки двигателя звездой (фиг. 192, *б*).



Фиг. 192. К примеру 2

При соединении звездой фазное напряжение меньше линейного в 1,73 раза, так как $U_л = U_ф \sqrt{3}$.

Следовательно, на фазу двигателя в этом случае придется:

$$U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1{,}73} = 220\ в,$$

т. е. напряжение фазной обмотки двигателя по-прежнему остается равным 220 *в*.

Ток в обмотке фазы останется прежний:

$$I_ф = \frac{220}{10} = 22\ а.$$

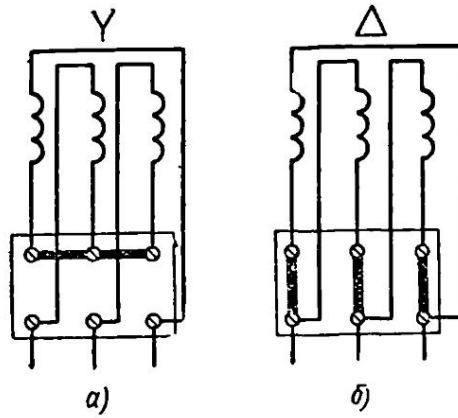
В двигателях и других потребителях трехфазного тока в большинстве случаев наружу выводят все шесть концов трех обмоток, которые по желанию можно соединять либо звездой, либо треугольником. Обычно к трехфазной машине крепится доска из изоляционного материала (клеммная доска), на которую и выводят все шесть концов.

На фиг. 193 показана схема присоединения контактов на клеммной доске к концам обмоток трехфазной машины. Медные перемычки позволяют легко менять схему включения обмоток.

Если у нас есть двигатель, на паспорте которого написано 127/220 *в*, значит этот двигатель можно использовать на два напряжения: 127 и 220 *в*.

Если линейное напряжение равно 127 *в*, то обмотки двигателя необходимо включить треугольником (фиг. 193, *б*). Тогда об-

мотка фазы двигателя попадает под напряжение 127 *в*. При напряжении 220 *в* обмотки двигателя нужно включить звездой (фиг. 193, *а*), тогда обмотка фазы также будет под напряжением 127 *в*.



Фиг. 193. Соединение концов обмоток с зажимным щитком трехфазной машины

§ 106. Мощность трехфазного переменного тока

Известно, что активная мощность однофазного переменного тока подсчитывается по формуле:

$$P = I_ф\ U_ф\ \cos\varphi\ вт,$$

где $I_ф$ и $U_ф$ — фазные значения тока и напряжения, а φ — угол сдвига фаз между ними.

При равномерной нагрузке трехфазной системы мощность, потребляемая каждой фазой, одинакова и поэтому мощность всех трех фаз

$$P = 3I_ф\ U_ф \cos\varphi\ вт.$$

Возьмем соединение звездой. Для него выше было найдено, что

$$I_л = I_ф;\ U_л = U_ф \sqrt{3}.$$

Подставляя в формулу мощности трех фаз линейные значения тока и напряжения, получим:

$$P = 3I_л \frac{U_л}{\sqrt{3}} \cos\varphi.$$

Тогда формула активной мощности трехфазного тока при соединении звездой примет вид:

$$P = \sqrt{3}\ I_л U_л \cos\varphi\ вт.$$

Полиая (кажущаяся) мощиость

$$S = \sqrt{3}\, I_л U_л \ ва.$$

Для соединиения треугольником известно, что

$$U_л = U_ф;$$
$$I_л = I_ф \sqrt{3}.$$

Подставляя в формулу мощности трех фаз линейиые значения тока и иапряжения, получим:

$$P = 3 \frac{I_л}{\sqrt{3}} U_л \cos \varphi,$$

и формула активиой мощности трехфазиого тока при соединиении треугольником примет вид:

$$P = \sqrt{3}\, I_л U_л \cos \varphi \ вт.$$

Полная (кажущаяся) мощность

$$S = \sqrt{3}\, I_л U_л \ ва.$$

Как видим, формулы мощности получились одинаковыми как для соединиения звездой, так и для соединения треугольником.

Таким образом, активную и полную мощиости трехфазной системы можно рассчитать по формулам:

$$P = \sqrt{3}\, IU \cos \varphi \ вт \ и \ S = \sqrt{3}\, IU \ ва,$$

где I и U — линейные значения тока и напряжеиия.

Не нужио забывать, что эти формулы пригодны только для равиомериой нагрузки.

Пример 3. Трехфазный потребитель с симметричной нагрузкой имеет активное сопротивление 6 *ом* и индуктивное сопротивление 8 *ом* в каждой фазе. Линеиное напряжение 220 *в*. Определить мощность потребители, если он соединеи звездой.

$$U_ф = \frac{U_л}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \ в;$$

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = \sqrt{100} = 10 \ ом;$$

$$I_ф = \frac{U_ф}{z} = \frac{127}{10} = 12{,}7 \ а;$$

$$\cos \varphi = \frac{r}{z} = \frac{6}{10} = 0{,}6;$$

$$P_ф = I_ф U_ф \cos \varphi = 12{,}7 \cdot 127 \cdot 0{,}6 = 967{,}74 \ вт.$$

Мощность всех трех фаз

$$P = 967{,}74 \cdot 3 = 2903{,}22 \ вт \approx 2{,}9 \ квт.$$

Мощность можно определить и так:

$$P = \sqrt{3}\, IU \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 12{,}7 \cdot 220 \cdot 0{,}6 = 2903{,}22 \text{ вт} \approx 2{,}9 \text{ квт}.$$

При неравномерной нагрузке приходится сначала подсчитать мощность, потребляемую каждой фазой в отдельности, а потом уже можно суммировать мощности всех трех фаз.

Пример 4. Обмотки потребителя трехфазного тока, соединенные треугольником, включены под линейное напряжение 380 *в* (фиг. 194).

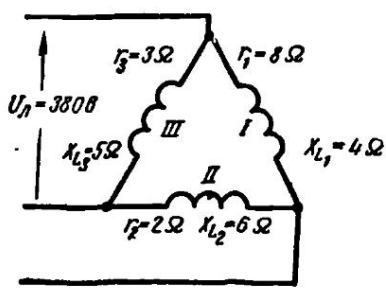
Активное сопротивление фазы *I* $r_1 = 8$ *ом*, индуктивное $x_{L1} = 4$ *ом*. Активное сопротивление фазы *II* $r_2 = 2$ *ом*, индуктивное $x_{L2} = 6$ *ом*. Активное сопротивление фазы *III* $r_3 = 3$ *ом*, индуктивное $x_{L3} = 5$ *ом*. Определить общую мощность трех фаз:

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_{L_1}^2} = \sqrt{8^2 + 4^2} = \sqrt{80} = 8{,}9 \text{ ом};$$

$$I_{\Phi 1} = \frac{U_\Phi}{z_1} = \frac{380}{8{,}9} = 42{,}6 \text{ а};$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{8}{8{,}9} = 0{,}9;$$

$$P_1 = I_{\Phi 1} U_{\Phi 1} \cos\varphi_1 = 42{,}6 \cdot 380 \cdot 0{,}9 = 14\,569 \text{ вт}.$$



Фиг. 194. К примеру 4

$$z_2 = \sqrt{2^2 + 6^2} = \sqrt{40} = 6{,}3 \text{ ом};$$

$$I_{\Phi 2} = \frac{380}{6{,}3} = 60{,}3 \text{ а};$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{2}{6{,}3} = 0{,}32;$$

$$P_2 = 60{,}3 \cdot 380 \cdot 0{,}32 = 7332 \text{ вт};$$

$$z_3 = \sqrt{3^2 + 5^2} = \sqrt{34} = 5{,}8 \text{ ом};$$

$$I_{\Phi 3} = \frac{380}{5{,}8} = 65{,}5 \text{ а};$$

$$\cos\varphi_3 = \frac{3}{5{,}8} = 0{,}51;$$

$$P_3 = 65{,}5 \cdot 380 \cdot 0{,}51 = 12\,694 \text{ вт}.$$

Мощность трех фаз

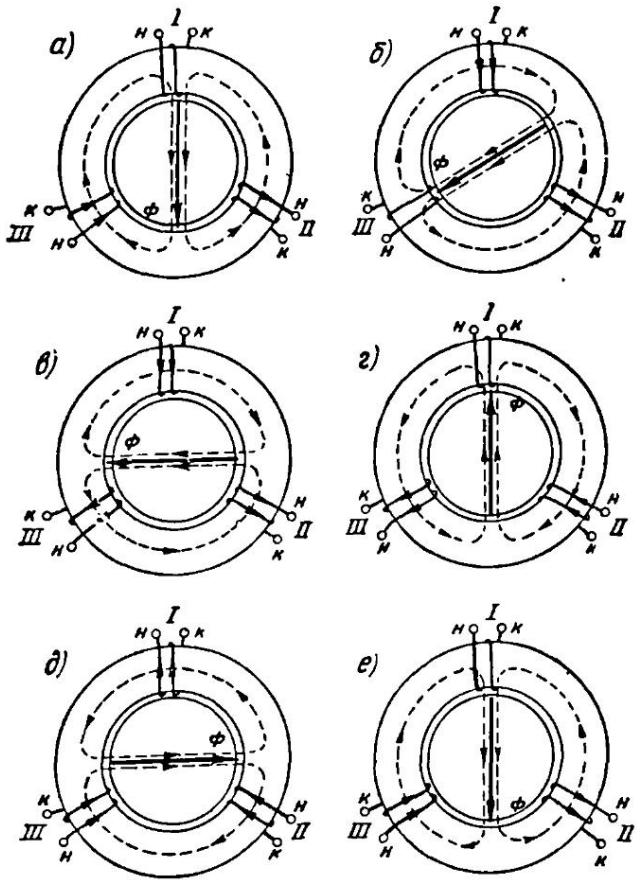
$$P = P_1 + P_2 + P_3 = 14\,569 + 7332 + 12\,694 = 34\,595 \text{ вт} \approx 34{,}6 \text{ квт}.$$

§ 107. Создание вращающегося магнитного поля при помощи трехфазного тока

Замечательной особенностью трехфазного тока (а также других многофазных токов) является его способность создавать вращающееся магнитное поле.

На стальное кольцо намотаем три катушки, сдвинутые одна относительно другой на 120°. Внутри стального кольца поместим стальной цилиндр. Пропустим по катушкам трехфазный пере-

менный ток (фиг. 195). Будем считать положительным направление тока, когда он течет от начала к концу катушек, а отрицательным направление тока, когда он течет от конца к началу катушек.



Фиг. 195. Получение вращающегося магнитного поля при помощи трехфазного тока

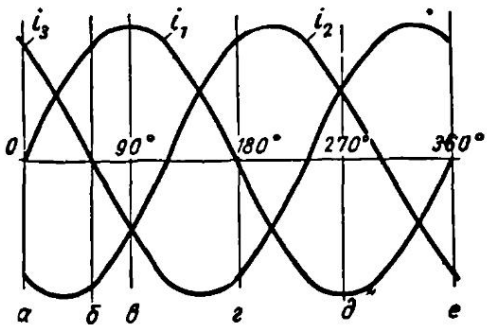
На фиг. 196 даны кривые изменения трехфазного переменного тока. Разберем положение *а*. Кривые показывают, что в это время ток первой фазы i_1 равен нулю. Ток третьей фазы i_3 имеет положительное значение, а ток второй фазы i_2 — отрицательное значение.

На фиг. 195 для положения *а* показаны направления токов в катушках каждой фазы. Направление магнитного поля, создаваемого каждой катушкой, определяется при помощи «правила

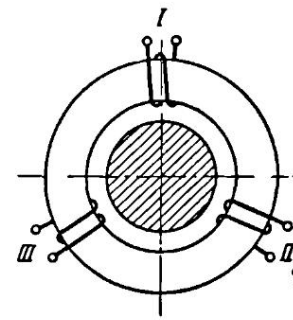
буравчика». Направлеиие результирующего магнитного поля показано вектором $Ф$.

Рассматривая различные положения от *а* до *е*, соответствеино отмечеиные на фиг. 195 и 196, находя направления токов каждой фазы и строя результирующий магиитиый поток, видим, что вектор $Ф$ по величине ие меняется, ио положение его в пространстве различно: ои вращается. Таким образом, внутри кольца будет создано вращающееся магнитное поле.

Направление вращения магнитного поля зависит от порядка чередования фаз (*I, II, III*). Меняя последовательность фаз, можно измеиять направление вращения поля. Для этой цели практически достаточно помеиять местами два любых фазных провода, идущих к обмоткам.



Фиг. 196. Кривые трехфазного тока



Фиг. 197. Способ получения вращающегося магнитного поля

Вращающееся магиитное поле нашло широкое практическое примеиение.

Если виутри стального кольца с тремя обмотками на нем поместить стальной же барабан (фиг. 197) и по обмоткам пропустить трехфазный перемеииый ток, то образовавшееся вращающееся магнитное поле будет пересекать барабан, индуктировать в нем токи, которые, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, приведут барабан во вращение.

В синхроиных и асинхронных двигателях перемеиного тока использована указанная выше способиость трехфазного перемеиного тока создавать вращающееся магнитное поле. Устройство этих двигателей будет подробнее описано иижe.

Вращающееся магнитное поле создается не только трехфазным перемеиным током, но также миогофазными токами (двух-, четырех-, шестифазными). Получить вращающееся поле можно и с помощью одиофазного переменного тока, искусственно создав сдвиг фаз между токами, иапример, двух катушек, расположенных в пространстве под углом 90°.

Задачи для самостоятельного решения

1. Напряжение между линейными проводами четырехпроводной системы трехфазного тока равно 220 *в*. В сеть включены 90 ламп накаливания по 150 *вт* каждая, поровну в каждую фазу. Определить, на какое напряжение должны быть рассчитаны лампы и какие токи протекают по линейным проводам.

2. Тридцать ламп накаливания, распределенные на три равные группы, включены между линейными проводами трехфазной сети. Ток одной лампы 0,5 *а*. Определить токи, протекающие в линейных проводах.

3. Мощность трехфазного трансформатора 50 *ква*. Определить активную мощность, которую может давать трансформатор при коэффициенте мощности нагрузки: 1; 0,8; 0,6; 0,2.

4. Какой ток потребляет из сети трехфазный двигатель мощностью 5,4 *квт*, если напряжение сети 220 *в*, а коэффициент мощности двигателя 0,8?

5. Три индуктивные катушки включены звездой. Активное сопротивление каждой катушки равно 6 *ом*, а индуктивное 5 *ом*. Определить активную и полную мощности, потребляемые тремя катушками, если напряжение сети равно 220 *в*.

6. Катушка со стальным сердечником имеет активное сопротивление 4 *ом*, индуктивное 6 *ом*. Что покажет трехфазный ваттметр, если три такие одинаковые катушки включить звездой, а потом треугольником в линию 220 *в*?

7. Напряжение генератора трехфазного тока равно 220 *в*. Ваттметр на щите показывает 13,2 *квт*. В линию включены треугольником лампы накаливания. Каждая из ламп потребляет ток 0,25 *а*. Определить число ламп, подключенных к генератору.

8. Электродвигатель трехфазного тока мощностью 3 *л. с.* включен в сеть напряжением 220 *в*. Коэффициент мощности двигателя равен 0,8. Определить ток, потребляемый двигателем из сети.

9. Трехфазный электродвигатель включен в сеть 220 *в* и потребляет ток 10 *а*. Cos φ двигателя 0,85, к. п. д. 80%. Определить мощность на валу двигателя.

10. Первая катушка имеет активное сопротивление 3 *ом* и индуктивное 20 *ом*. Вторая катушка имеет активное сопротивление 2 *ом* и индуктивное 15 *ом*. Третья катушка имеет активное сопротивление 6 *ом* и индуктивное 30 *ом*. Катушки соединены треугольником и включены в сеть 120 *в*. Определить активную мощность, потребляемую тремя катушками.

11. На паспорте генератора трехфазного тока написано: напряжение 127 *в*, ток 40 *а*. Какое максимальное количество ламп накаливания можно подключить к машине, если лампы соединены треугольником и каждая из них потребляет ток 0,25 *а*?

Контрольные вопросы

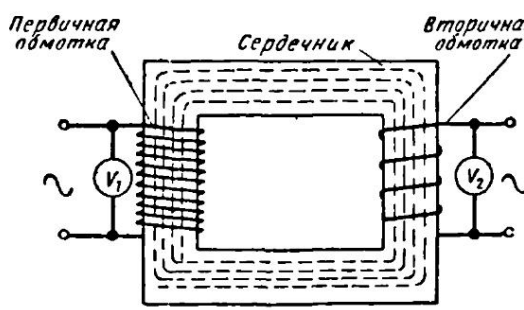
1. Что такое трехфазный переменный ток?
2. Как получается трехфазный ток?
3. Что называется шести-, четырех- и трехпроводной системой трехфазного тока?
4. Какое напряжение называется фазным и какое линейным?
5. Каковы соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами при соединении звездой и треугольником?
6. Каким образом трехфазный ток может создавать вращающееся магнитное поле?

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ТРАНСФОРМАТОРЫ

§ 108. Общие сведения о трансформаторах

В 1876 г. П. И. Яблочков предложил пользоваться трансформатором для питания свечей. В дальнейшем конструкции трансформаторов разрабатывал другой русский изобретатель, механик И. Ф. Усагин, который предложил применять трансформаторы для питания не только свечей Яблочкова, но и других потребителей электрической энергии.



Фиг. 198. Схема устройства трансформатора

Выше было указано, что трансформатор представляет собой электрический аппарат, основанный на явлении взаимоиндукции и предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения, но той же самой частоты. Простейший трансформатор имеет стальной сердечник и две обмотки, изолированные как от сердечника, так и друг от друга (фиг. 198).

Обмотка трансформатора, которая подключается к источнику напряжения, называется первичной обмоткой, а та обмотка, к которой подключаются потребители (лампы накаливания, электродвигатели, нагревательные приборы и т. д.) или ли-

нии передачи, ведущие к потребителям, называется **вторичной обмоткой**.

Переменный ток, проходя по первичной обмотке, создает переменный магнитный поток, который сцепляется с витками вторичной обмотки и наводит в них э. д. с.

Так как магнитный поток переменный, то индуктированная э. д. с. во вторичной обмотке трансформатора также переменная и частота ее равна частоте тока в первичной обмотке.

Переменный магнитный поток, проходящий по сердечнику трансформатора, пересекает не только вторичную обмотку, но и первичную обмотку трансформатора. Поэтому в первичной обмотке также будет индуктироваться э. д. с.

Величины э. д. с., индуктирующихся в обмотках трансформатора, зависят от частоты переменного тока, числа витков каждой обмотки и величины магнитного потока в сердечнике, т. е. $E=4{,}44f w\Phi_m$. При определенной частоте и неизменном магнитном потоке величина э. д. с. каждой обмотки зависит только от числа витков этой обмотки. Эту зависимость между величинами э. д. с. и числами витков обмоток трансформатора можно выразить формулой:

$$\frac{E_1}{E_2}=\frac{w_1}{w_2},$$

где E_1 и E_2 — э. д. с. первичной и вторичной обмоток;

w_1 и w_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток.

Вольтметры V_1 и V_2, включенные к зажимам первичной и вторичной обмоток (фиг. 198), покажут нам напряжения U_1 и U_2 этих обмоток.

Если обозначить напряжение вторичной обмотки при холостом ходе через U_2, то для трансформаторов обычной конструкции при холостом ходе можно написать $U_1\approx E_1$ и $U_2\approx E_2$.

Однако практически разница между э. д. с. и напряжениями так мала, что зависимость между напряжениями и числами витков обеих обмоток можно выразить формулой:

$$\frac{U_1}{U_2}\approx\frac{w_1}{w_2}.$$

Из этой формулы видно, что во сколько раз число витков в первичной обмотке больше (или меньше) числа витков вторичной обмотки, во столько же раз напряжение первичной обмотки больше (или меньше) напряжения вторичной обмотки.

Разница между э. д. с. и напряжением в первичной обмотке трансформатора становится особенно малой тогда, когда вторичная обмотка разомкнута и ток в ней равен нулю (холостая работа), а в первичной обмотке протекает только небольшой ток, называемый током холостого хода. При этом напряжение на зажимах вторичной обмотки равно наводимой в ней э. д. с.

Число, показывающее, во сколько раз напряжение в первич-

ной обмотке больше (или меньше) напряжения во вторичной обмотке, называется коэффициентом трансформации трансформатора и обозначается буквой k.

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Номинальное напряжение обмоток высшего и низшего напряжений, указанное на заводском щитке трансформатора, относится к режиму холостого хода.

Номинальные токи обмоток принимаются равными частным от деления номинальной мощности трансформатора на соответствующие номинальные напряжения.

Пример 1. Имеется трансформатор, первичная обмотка которого включена в сеть 6600 *в*, а на зажимах вторичной обмотки напряжение равно 230 *в*. Определить коэффициент трансформации.

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{6600}{230} = 28{,}7.$$

В паспорте каждого трансформатора всегда даны номинальные напряжения обеих обмоток, относящиеся к режиму холостого хода. Поэтому коэффициент трансформации можно легко определить.

Коэффициент трансформации можно определить и опытным путем. Для этого нужно (соблюдая правила техники безопасности, чтобы не попасть под высокое напряжение) включить вольтметры к зажимам первичной и вторичной обмоток трансформатора и разомкнуть цепь вторичной обмотки, обеспечив тем самым холостую работу трансформатора. После этого показание вольтметра первичной обмотки следует разделить на показание вольтметра вторичной обмотки.

Пример 2. Первичная обмотка трансформатора включена в сеть напряжением 10 000 *в*; на зажимах вторичной обмотки напряжение равно 100 *в*. Определить коэффициент трансформации трансформатора и число витков вторичной обмотки, если число витков первичной обмотки равно 21 000.

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{10\,000}{100} = \frac{U_1}{U_2} = 100.$$

Для определения числа витков вторичной обмотки воспользуемся формулой

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Подставляя цифры, получим:

$$\frac{10\,000}{100} = \frac{21\,000}{w_2},$$

откуда

$$w_2 = \frac{100 \cdot 21\,000}{10\,000} = 210 \text{ витков.}$$

Тот же ответ получится, если вспомнить, что

$$k = \frac{w_1}{w_2}, \text{ откуда } w_2 = \frac{w_1}{k}.$$

Так как

$$k = 100, \text{ а } w_1 = 21\,000,$$

то

$$w_2 = \frac{21\,000}{100} = 210 \text{ витков.}$$

В рассмотренных нами примерах трансформаторы служили для понижения напряжения. Такие трансформаторы называются понижающими, и коэффициент трансформации у них больше единицы.

Пример 3. Возьмем тот же трансформатор, что и в предыдущем примере. Если на зажимы обмотки, имеющей число витков 21 000, подать не 10 000 *в*, как было в предыдущем примере, а, например, 9900 *в*, то так как во вторичной обмотке 210 витков, т. е. в 100 раз меньше, чем в первичной обмотке, вторичное напряжение будет также в 100 раз меньше первичного напряжения. Подставив в формулу

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

цифры, получим:

$$\frac{9900}{U_2} = \frac{21\,000}{210}; \quad U_2 = \frac{9900 \cdot 210}{21\,000} = 99 \text{ в.}$$

Из рассмотренного примера можно сделать вывод, что уменьшение напряжения в первичной обмотке сопровождается уменьшением напряжения во вторичной обмотке трансформатора.

Пример 4. Если в том же трансформаторе, который мы брали в двух предыдущих примерах, обмотку с числом витков 210 переключить, например, на напряжение 100 *в*, то эта обмотка теперь будет называться первичной обмоткой. Во вторичной обмотке с числом витков 21 000 напряжение будет в 100 раз больше, т. е. 10 000 *в*.

Коэффициент трансформации трансформатора будет:

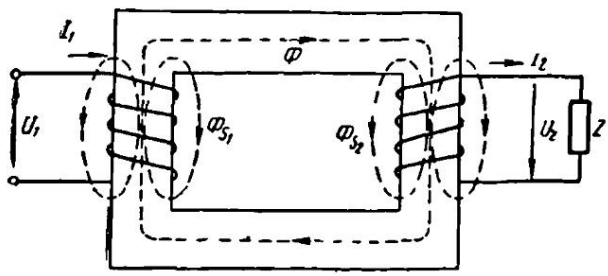
$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{100}{10\,000} = \frac{1}{100}.$$

Трансформатор, рассмотренный в последнем примере, служит для повышения напряжения. Такие трансформаторы называются повышающими, и коэффициент трансформации у них меньше единицы.

До сих пор мы исходили из предположения, что магнитный поток трансформатора целиком замыкается через сердечник. В действительности дело обстоит несколько иначе. Бóльшая

часть магнитных потоков, создаваемых первичной и вторичной обмотками трансформатора, замыкается через сердечник, другая — меньшая часть — в виде потоков рассеяния Φ_{s_1} и Φ_{s_2} замыкается вокруг отдельных витков через воздух (фиг. 199).

Здесь первичная и вторичная обмотки для наглядности расположены на различных стержнях. В действительности же для уменьшения потоков рассеяния, а следовательно Φ_{s_1} и Φ_{s_2}, обмотки помещают на обоих стержнях.



Фиг. 199. Магнитные потоки трансформатора

Потоки рассеяния индуктируют в своих обмотках э. д. с., величины которых могут быть определены по формулам:

$$E_{s1} = 2\ \pi f L_{s1} I_1,$$
$$E_{s2} = 2\pi f L_{s2} I_2,$$

где L_{s1} и L_{s2} — индуктивности рассеяния обмоток.

Обозначая

$$x_{s1} = 2\pi f L_{s1},$$
$$x_{s2} = 2\ \pi f L_{s2},$$

получим:

$$E_{s1} = x_{s1} I_1,$$
$$E_{s2} = x_{s2} I_2,$$

где x_{s_1} и x_{s_2} — индуктивные сопротивления рассеяния обмоток.

§ 109. Холостая работа трансформатора

Режим, при котором вторичная обмотка трансформатора разомкнута, а на зажимы первичной обмотки подано переменное напряжение, называется холостым ходом или холостой работой трансформатора.

Магнитный поток, возбуждаемый первичной обмоткой, индуктирует во вторичной обмотке э. д. с., величина которой равна:

$$E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_m,$$

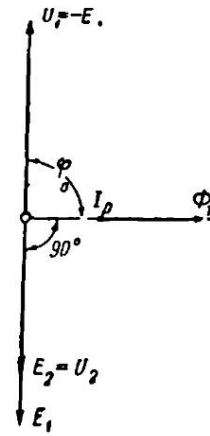
тот же самый магнитный поток индуктирует в первичной обмотке э. д. с.

$$E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_m,$$

которая в трансформаторе без потерь уравновешивает приложенное напряжение U_1.

Небольшой ток, потребляемый первичной обмоткой трансформатора при холостом ходе, называется **током холостого хода**. Величина этого тока обычно составляет 3,5—10% от тока при номинальной нагрузке трансформатора.

Построим векторную диаграмму напряжений холостой работы однофазного трансформатора без потерь (идеального) (фиг. 200). Намагничивающий ток I_p создает магнитный поток Φ_m, который совпадает с током I_p по фазе.



Фиг. 200. Векторная диаграмма холостой работы идеального трансформатора

Магнитный поток Φ_m индуктирует в первичной обмотке э. д. с. E_1, а во вторичной обмотке э. д. с. E_2. Напомним, что всякая э. д. с., индуктируемая синусоидально изменяющимся магнитным потоком, отстает от потока по фазе на 90° (см. § 86). Поэтому векторы E_1 и E_2 мы откладываем под углом 90° от потока Φ_m в сторону, обратную вращению векторов.

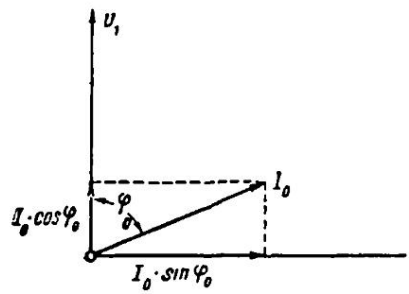
Индуктированную в первичной обмотке э. д. с. E_1 уравновешивает напряжение сети U_1. Э. д. с. E_1 и напряжение U_1 равны и взаимно противоположны.

Из векторной диаграммы видно, что ток I_p, потребляемый трансформатором при холостой работе, отстает от напряжения сети U_1 на 90°.

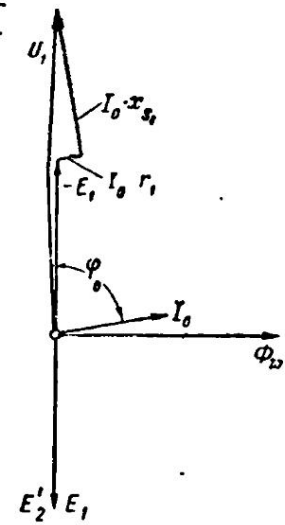
В реальном трансформаторе необходимо учитывать потери и рассеяние магнитного потока. Потери будут иметь место в стали и в меди. К потерям в стали относятся потери на гистерезис и вихревые токи, возникающие в стальном сердечнике; электрические потери в меди трансформатора слагаются из потерь на тепло в его обмотках при нагревании их током. От других машин и аппаратов трансформатор отличается замкнутой магнитной системой и отсутствием вращающихся частей. Поэтому потери в нем малы и к. п. д. трансформаторов больших мощностей достигает 99% и выше.

Ток холостого хода I_0 трансформатора имеет две составляющие (фиг. 201): 1) активную $I_a = I_0 \cos\varphi_0$, вызванную потерями в стали. Эта составляющая очень мала, так как малы потери холостого хода; 2) реактивную $I_p = I_0 \sin\varphi_0$, называемую током намагничивания, создающую магнитный поток Φ_m и совпадающую с ним по фазе. В силу малости активной составляющей $I_0 \cos\varphi_0$ намагничивающий ток почти равен всему току холостого хода I_0. Поэтому I_0 является почти целиком реактивным.

Большая разница между напряжениями первичной и вторичной обмоток трансформаторов затрудняет построение



Фиг. 201. Диаграмма тока холостого хода



Фиг. 202. Векторная диаграмма холостого хода реального трансформатора

их векторных диаграмм. Поэтому при изучении трансформаторов вторичная обмотка приводится к числу витков первичной обмотки. Приведение заключается в том, что число витков w_2 вторичной обмотки предполагают равным числу витков w_1 первичной обмотки. При этом э. д. с., ток и сопротивление вторичной обмотки изменяются. Приведение величин вторичной обмотки к числу витков первичной не должно изменять мощности и углов сдвига фаз в трансформаторе.

Приведенные величины вторичной обмотки обозначаются буквами со штрихом сверху, например E_2', I_2', r_2' и т. д. Чтобы получить E_2', нужно изменить E_2 пропорционально коэффициенту трансформации $k = \frac{w_1}{w_2}$.

Следовательно,

$$E_2' = \frac{w_1}{w_2} E_2 = kE_2 = E_1.$$

Приведенный вторичный ток I_2' определяется из условия, что после приведения полная мощность вторичной обмотки должна остаться неизменной:

$$E_2' I_2' = E_2 I_2,$$

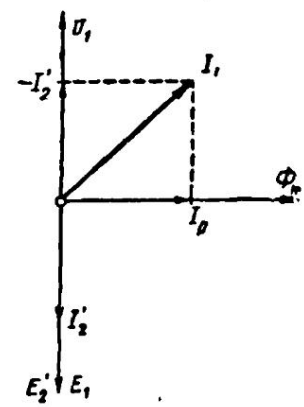
откуда

$$I_2' = \frac{E_2}{E_2'} I_2 = \frac{1}{k} I_2.$$

Построим векторную диаграмму напряжений холостой работы реального трансформатора (фиг. 202). Напряжение сети, приложенное к первичной обмотке, должно уравновесить э. д. с. $-E_1$, активное падение напряжения $I_0 r_1$, совпадающее с током I_0 по фазе, и индуктивное падение напряжения $I_0 x_s$, опережающее ток I_0 по фазе на 90°. Геометрическая сумма векторов — E_1, $I_0 r_1$ и $I_0 x_s$, дает напряжение сети U_1.

§ 110. Нагрузка трансформатора

Нагрузкой трансформатора называется режим, при котором вторичная обмотка замкнута на какое-либо сопротивление. При этом во вторичной обмотке будет проходить ток I_2, который создаст свой магнитный поток Φ_2. Таким образом, при нагрузке трансформатора в нем будут действовать намагничивающие силы (сокращенно — н. с.) двух обмоток, а в сердечнике его будет магнитный поток, полученный действием потоков обеих обмоток.



Фиг. 203. Векторная диаграмма идеального трансформатора при активной нагрузке

Согласно правилу Ленца магнитный поток вторичной обмотки Φ_2 стремится уменьшить поток первичной обмотки. Однако результирующий магнитный поток должен остаться постоянным (точнее почти постоянным), так как индуктированная им э. д. с. E_1 при неизменном напряжении сети U_1 должна остаться почти неизменной и почти равной напряжению U_1. Построим векторную диаграмму для режима нагрузки идеального трансформатора в случае, когда к зажимам его вторичной обмотки подключено активное сопротивление.

Магнитный поток трансформатора Φ_m и намагничивающий ток I_p совпадают по фазе (фиг. 203). Электродвижущие силы E_1 и E_2' отстают по фазе на 90° от магнитного потока Φ_m. Так как нагрузка активная и трансформатор не имеет потерь, то ток I_2' совпадает по фазе с э. д. с. E_2'. При нагрузке трансформатора

геометрическая сумма намагничивающих сил первичной и вторичной обмоток будет почти равна намагничивающей силе первичной обмотки при холостом ходе.

$$\overline{I}_1 w_1 + \overline{I}_2 w_2 = \overline{I}_0 w_1.$$

Намагничивающая сила вторичной обмотки $I_2 w_2$ согласно правилу Ленца будет стремиться уменьшить поток первичной обмотки. Поэтому по виткам первичной обмотки должен проходить такой ток I_1, который возбуждал бы магнитный поток Φ_m и, кроме того, компенсировал размагничивающее действие вторичной обмотки. Иначе говоря, намагничивающая сила первичной обмотки $I_1 w_1$ должна слагаться из намагничивающей силы $I_0 w_1$, создающей поток Φ_m намагничивающей силы $I_2 w_2$, компенсирующей намагничивающую силу вторичной обмотки:

$$I_1 w_1 = I_0 w_1 - I_2 w_2$$

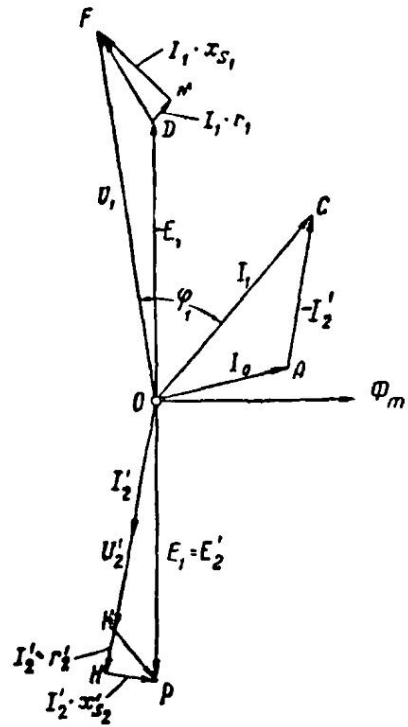
или

$$\overline{I}_1 = -\overline{I}_2 \frac{w_2}{w_1} + \overline{I}_0 = -\overline{I}'_2 + \overline{I}_0,$$

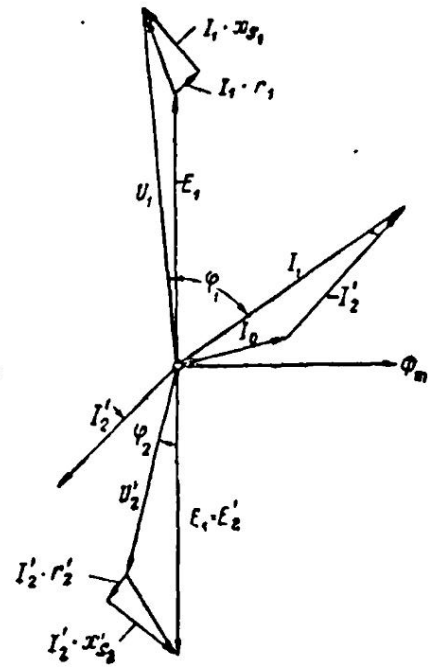
т. е. в этом случае первичный ток равен геометрической сумме тока при холостом ходе $\overline{I}_0$ и отрицательного значения приведенного тока вторичной обмотки $\overline{I}_2'$.

Построим векторную диаграмму реального трансформатора при активной нагрузке (фиг. 204). Напряжение на зажимах вторичной обмотки U_2' при нагрузке меньше э. д. с. $\overline{E}_2'$ на величину падений напряжений в самой обмотке. Поэтому напряжение U_2' (вектор OK) мы получим, если из э. д. с. E_2' (OP) геометрически вычтем индуктивное падение напряжения $I_2' x'_{s2}$ и активное падение напряжения $I_2' r_2'$. Так как нагрузка активная, то ток $\overline{I}_2'$ совпадает по фазе с напряжением U_2'. Ток первичной цепи $\overline{I}_1$ получен в результате геометрического сложения токов холостого хода $\overline{I}_0$ и приведенного нагрузочного $\overline{U}_2'$, взятого с обратным знаком — I_2'. Напряжение, подводимое к первичной обмотке U_1 трансформатора, должно уравновешивать э. д. с. E_1 и падение напряжения в этой обмотке. Поэтому для получения напряжения U_1 мы должны геометрически сложить — E_1', уравновешивающую э. д. с. E_1 (OD), активное падение напряжения в первичной обмотке $I_1 r_1$ (DM), совпадающее по фазе с током, и индуктивное падение напряжения в этой обмотке $I_1 x_{s1}$ (MF). Вектор OF определяет величину и фазу приложенного напряжения U_1.

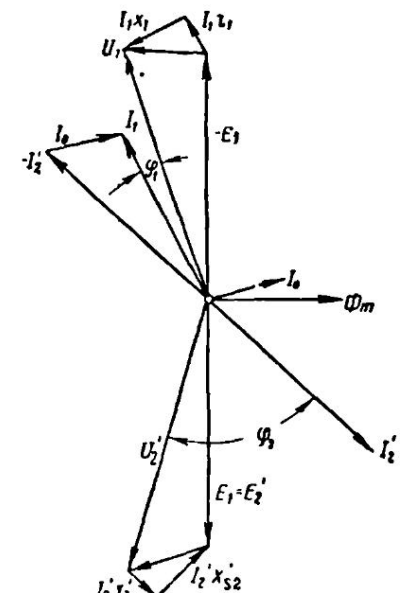
Векторная диаграмма трансформатора при активно-индуктивной нагрузке показана на фиг. 205, а при активной и емкостной нагрузках — на фиг. 206. Из построения векторных диаграмм реального трансформатора видно, что увеличение тока нагрузки I_2 приводит: 1) к увеличению падения напряжения во вторичной обмотке; 2) к уменьшению напряжения U_2 на зажи-



Фиг. 204. Векторная диаграмма реального трансформатора при активной нагрузке



Фиг. 205. Векторная диаграмма реального трансформатора при активной и индуктивной нагрузке



Фиг. 206. Векторная диаграмма трансформатора при активной и емкостной нагрузке

мах вторичной обмотки (при наличии емкостной нагрузки напряжение U_2 может увеличиваться); 3) к увеличению тока I_1 в первичной цепи; 4) к увеличению падения напряжения в первичной обмотке; 5) при постоянной величине приложенного напряжения U_1 это вызовет уменьшение E_1; 6) э. д. с. E_1 может уменьшиться только за счет уменьшения магнитного потока трансформатора Φ_m.

Таким образом, увеличение тока нагрузки I_2 приводит не только к увеличению тока I_1, потребляемого трансформатором из сети, но также к уменьшению магнитного потока в сердечнике. Однако в пределах от холостого хода до полной нагрузки изменения магнитного потока Φ_m невелики и часто при приближенных расчетах его считают неизменным.

§ 111. Опыты холостого хода и короткого замыкания трансформатора

Если подключить первичную обмотку трансформатора к напряжению сети, а зажимы его вторичной обмотки замкнуть накоротко, то это приведет к опасному явлению короткого замыкания трансформатора. Токи короткого замыкания выделяют большое количество тепла в обмотках, что может привести к порче изоляции проводников обмоток, разложению и воспламенению масла, залитого в бак трансформатора. Механические усилия, возникающие в обмотках трансформатора при коротких замыканиях, иногда могут привести к разрушению обмоток.

Если же зажимы вторичной обмотки трансформатора замкнуть накоротко, а первичную обмотку подключить к пониженному напряжению, чтобы ток короткого замыкания $I_{2к}$ был бы равен номинальному току $I_{2н}$, то при этом с трансформатором ничего опасного не произойдет. Этот опыт называется опытом короткого замыкания. Напряжение, под которое включается первичная обмотка трансформатора при опыте короткого замыкания, составляет несколько процентов от номинального напряжения этой обмотки, называется напряжением короткого замыкания и обозначается $U_к$.

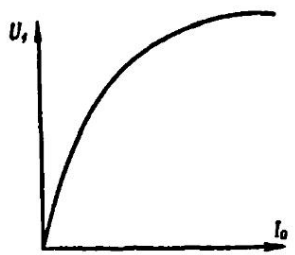
Силовые трансформаторы, изготовляемые в СССР, имеют напряжение короткого замыкания, равное 5—10% (в некоторых случаях 17%) от номинального первичного напряжения.

При испытаниях трансформаторов всегда снимают характеристики холостого хода и короткого замыкания.

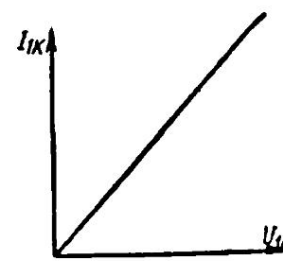
Для снятия характеристики холостого хода трансформатора его вторичную обмотку размыкают, а в первичную обмотку включают амперметр, вольтметр и ваттметр. Постепенно увеличивают напряжение, к которому включена первичная обмотка, и записывают показания приборов. Примерная характеристика холостого хода трансформатора показана на фиг. 207.

При небольших напряжениях, соответствующих начальной части характеристики холостого хода, магнитная система трансформатора не насыщена и существует пропорциональность между напряжением U и током I_0. При дальнейшем увеличении напряжения сердечник трансформатора насыщается и при этом ток I_0 начинает увеличиваться быстрее напряжения.

По данным опыта холостого хода подсчитываются сопротивления, коэффициент мощности, активная и реактивная составляющие тока холостого хода трансформатора. Мощность, подводимая к трансформатору при холостом ходе, идет на покрытие потерь холостого хода. Так как ток холостого хода I_0 мал, то потерями мощности на нагрев первичной обмотки, равными $I_0^2 r_1$, можно пренебречь и считать, что мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе, идет на покрытие потерь в стали сердечника.



Фиг. 207. Характеристика холостого хода трансформатора



Фиг. 208. Характеристика короткого замыкания трансформатора

Для снятия характеристики короткого замыкания трансформатора в цепь его первичной обмотки включают амперметр, вольтметр и ваттметр, а вторичную обмотку замыкают через амперметр накоротко. Увеличивают напряжение, к которому подключена первичная обмотка, до тех пор, пока амперметр во вторичной обмотке не покажет вторичный номинальный ток. По данным опыта короткого замыкания подсчитываются сопротивления и напряжение короткого замыкания.

По данным опыта строится характеристика короткого замыкания, из которой видно, что между током и напряжением существует линейная зависимость. Это объясняется тем, что магнитный поток в сердечнике мал, так как напряжение короткого замыкания во много раз меньше номинального напряжения. Поэтому потерями в стали при опыте короткого замыкания можно пренебречь и считать, что мощность при этом опыте идет на покрытие потерь в меди в обмотках трансформатора $(I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2)$. Примерная характеристика короткого замыкания дана на фиг. 208.

По данным опытов холостого хода и короткого замыкания можно определить коэффициент полезного действия трансформатора по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta P_н \cos \varphi_2}{\beta P_н \cos \varphi_2 + P_о + \beta^2 P_м},$$

где $P_о$ — потери в стали, которые практически равны потерям, измеренным в опыте холостого хода при номинальном напряжении;

$\beta^2 P_м$ — потери в меди, пропорциональные квадрату кратности тока нагрузки;

$P_м$ — потери в меди при номинальной нагрузке, практически равные $P_к$, измеренным в опыте короткого замыкания при $I_к = I_н$;

$\beta = \frac{I_2}{I_{2н}}$ — кратность тока нагрузки.

§ 112. Роль трансформатора при передаче электрической энергии на расстояние

Пример 5. На электростанции установлен генератор постоянного тока мощностью 200 *квт*, напряжением 230 *в*. Требуется подсчитать необходимое сечение медных проводов линий передачи, идущей к потребителю, расположенному на расстоянии 10 *км* от электростанции.

Ток, протекающий как по обмотке генератора, так и в линии передачи, будет:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{200\,000}{230} = 870 \text{ а}.$$

В линии передачи имеют место тепловые потери. Избежать их нельзя. Можно лишь ограничить величину этих потерь.

Пусть допустимые потери в линии составляют 10% от передаваемой мощности, т. е. 20 *квт*. Сопротивление линии находим из формулы $P = 2 \cdot I^2 \cdot r$, откуда сопротивление одного провода

$$r = \frac{P}{2 \cdot I^2} = \frac{20\,000}{2 \cdot 870^2} = 0{,}013 \text{ ом}.$$

Из формулы

$$r = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

можно определить сечение проводов линии:

$$S = \frac{\rho \cdot l}{r} = \frac{0{,}0175 \cdot 10\,000}{0{,}013} = 13\,461 \text{ мм}^2.$$

Такое сечение имел бы провод диаметром 13,4 *см*. Один метр такого провода весил бы 119,8 *кг*. Медный провод для всей линии весил бы 2396 *т*.

Полученный нами результат показывает, что пользоваться постоянным током низкого напряжения для передачи даже относительно небольших количеств электроэнергии на большое расстояние нельзя.

Попробуем теперь заменить на нашей электростанции генератор постоянного тока генератором переменного тока. Пусть этот генератор имеет напря-

жение 230 *в* и ту же мощность в 200 *квт*. Будем считать нагрузку сети активной.

На электрической станции установим повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации 1 : 43,4 (фиг. 209).

Напряжение линии передачи будет $230 \cdot 43{,}4 = 10\,000$ *в*. Ввиду незначительных потерь в самом трансформаторе примем мощность, подводимую к первичной обмотке трансформатора, равной мощности, отдаваемой вторичной обмоткой.

Если мощность первичной обмотки равна 200 *квт*, то такова же будет мощность и вторичной обмотки. Отсюда вторичный ток трансформатора

$$I = \frac{P}{U} = \frac{200\,000}{10\,000} = 20 \text{ а}.$$

Формула

$$P = 2 \cdot I^2 \cdot r$$

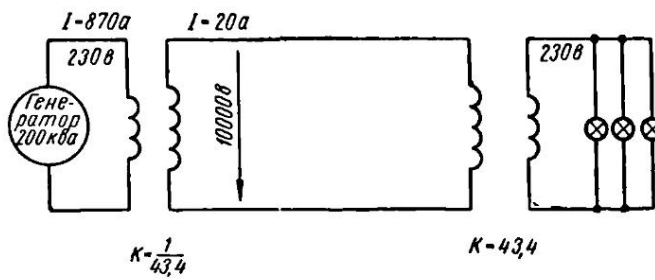
показывает, что так как ток в проводах линии передачи уменьшился в 43,4 раза при той же допускаемой затрате мощности в линии, то сопротивление проводов может быть в $43{,}4^2$ раза больше, а сечение в $43{,}4^2$ раза меньше, т. е.

$$S = \frac{13\,461}{43{,}4^2} = 7{,}1 \text{ мм}^2.$$

Выбираем стандартное сечение 10 $мм^2$.

Из рассмотренного примера понятна роль трансформатора при передаче электроэнергии на расстояние.

Увеличивая напряжение линии при помощи повышающего трансформатора, мы уменьшаем ток в проводах линии и сече-



Фиг. 209. Применение трансформатора при передаче электроэнергии на расстояние

ние проводов можно выбирать меньшим.. Чем длиннее линия передачи и чем больше передаваемая электрическая мощность, тем выше должно быть напряжение между проводами линии.

Однако обычно нельзя подключать потребители к линии высокого напряжения. Поэтому в конце линии ставят второй — понижающий трансформатор, который преобразует электрическую энергию тока высокого напряжения в энергию тока низкого напряжения, доступную для использования ее потребителями. В нашем примере (фиг. 209) установлен понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации $k = 43{,}4$. Таким образом, потребители получат ток напряжением, несколько меньшим 230 *в*,

если учесть падение напряжения в линии и трансформаторах (падением напряжения в линии электропередачи для простоты пренебрегаем).

В настоящее время имеются линии передачи с напряжением 220, 287, 400 *кв*. Построенная высоковольтная линия Куйбышев — Москва длиной около 900 *км* передает электрическую энергию под напряжением 400 *кв*. Линия Волгоград — Москва строится на напряжении 500 *кв*.

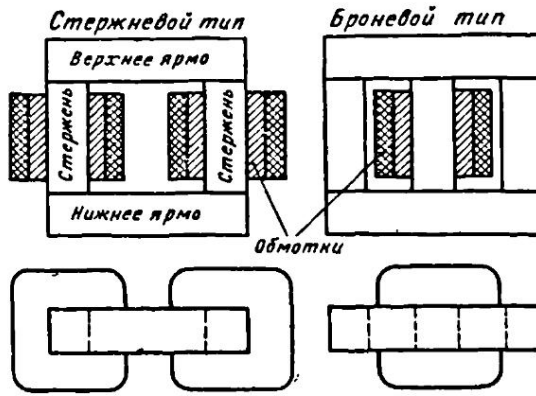
Увеличение напряжения на линии сопровождается увеличением числа изоляторов, на которых подвешиваются провода, увеличением размеров опор, увеличением стоимости повышающих и понижающих трансформаторов и подстанций. Передача мощности до 1 млн. *квт* на расстояние 1—2 тыс. *км* потребует напряжения в 500—600 *кв*.

В настоящее время используются колоссальные энергетические ресурсы нашей страны. Строятся новые гидростанции на реках Сибири, Средней Азии, Азербайджана, Армении. Строятся гелиоустановки (солнечные двигатели) в Средней Азии; строятся крупные тепловые электроцентрали вблизи топливных месторождений и газотурбинные станции, использующие газ, полученный путем переработок под землей угля или сланцев. Строятся электрические станции, работающие при помощи атомной энергии. Все это влечет за собой развитие мощных энергетических систем, нередко удаленных одна от другой на очень большие расстояния. Использование энергии отдельных систем возможно, если они будут связаны в единую высоковольтную сеть.

Экономические подсчеты показали, что на очень большие расстояния выгоднее передавать электрическую энергию постоянным током очень высокого напряжения (до 1 млн. *в*). Стоимость линии и ее оборудования в этом случае почти вдвое меньше, чем стоимость линии переменного тока. Передача постоянным током на сверхдальние расстояния будет идти по следующей схеме. Генераторы электрической станции вырабатывают трехфазный переменный ток напряжением порядка 15 *кв*. Повышающий трансформатор повышает напряжение, получаемое от генератора, до нескольких сот киловольт. Здесь же, на станции, при помощи специальных выпрямителей переменный ток преобразуется в постоянный ток высокого напряжения, который и поступает на один конец линии передачи. На другом конце линии установлен аппарат — инвертор, назначение которого состоит в том, чтобы преобразовать постоянный ток обратно в переменный ток, напряжение которого затем при помощи понижающего трансформатора снижается до напряжения, необходимого потребителям. В настоящее время строится линия передачи постоянного тока Волгоград — Донбасс напряжением 800 *кв* (напряжение между проводом и землей ±400 *кв*), длиной 470 *км* при передаваемой мощности 750 000 *квт*.

§ 113. Устройство и типы трансформаторов

Сердечник (магнитопровод) трансформатора образует замкнутый для магнитного потока контур и изготовляется из листовой электротехнической (трансформаторной) стали толщиной 0,5 и 0,35 *мм* марки Э4-2. Электротехническая сталь представляет собой сталь, в состав которой входит 4,0—4,8% кремния по весу. Присутствие кремния улучшает магнитные свойства стали и увеличивает ее удельное сопротивление вихревым токам. Отдельные листы стали для изоляции их один от другого покрывают слоем лака, после чего стягивают болтами, пропущенными в изолирующих втулках. Такое устройство применяется для



Фиг. 210. Типы сердечников трансформаторов

уменьшения вихревых токов, индуктируемых в стали переменным магнитным потоком. Части магнитопровода, на которые надевается обмотка, называются стержнями. Стержни соединяются верхним и нижним ярмом.

По конструкции магнитопровода различают два типа трансформаторов: стержневые и броневые (фиг. 210). У трансформатора стержневого типа обмотки охватывают стержни магнитопровода; у трансформатора броневого типа магнитопровод, наоборот, как «броней», охватывает обмотки. В случае неисправности в обмотке броневого трансформатора ее неудобно осматривать и трудно ремонтировать. Поэтому наибольшее распространение получили трансформаторы стержневого типа.

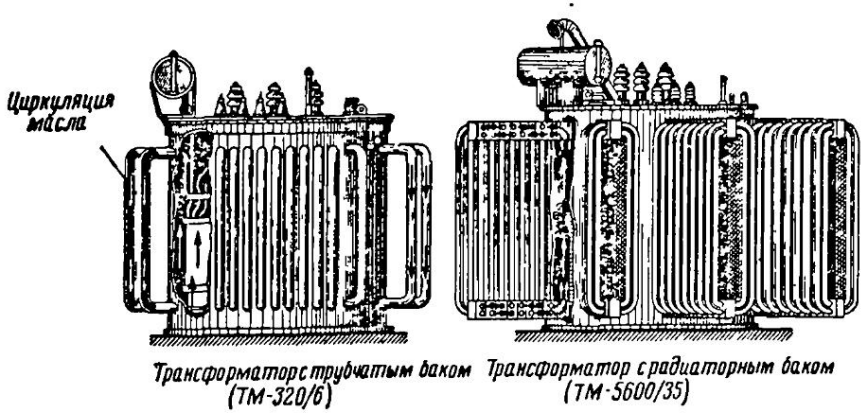
Обмотка трансформаторов выполняется из изолированной круглой или прямоугольной меди. На стержень магнитопровода предварительно надевают изолирующий (обычно картонный, пропитанный бакелитовым лаком) цилиндр, на котором помещают обмотку низшего напряжения. Расположение обмотки низшего напряжения ближе к стержню объясняется тем, что ее

проще изолировать от стального стержня, чем обмотку высшего напряжения.

На наложенную обмотку низшего напряжения надевают другой изолирующий цилиндр, на который помещают обмотку высшего напряжения. Расположение этой обмотки снаружи удобно еще тем, что при неисправностях (которые чаще случаются в высоковольтной обмотке) она доступна для осмотра и ремонта.

Концы обмоток высшего и низшего напряжения выводятся через проходные изоляторы, укрепленные на стальной крышке трансформатора.

Сердечник с обмотками обычно опускают в бак прямоугольной или овальной формы, изготовленный из листовой стали. В бак заливается специальное трансформаторное масло, обладающее большой электрической прочностью.



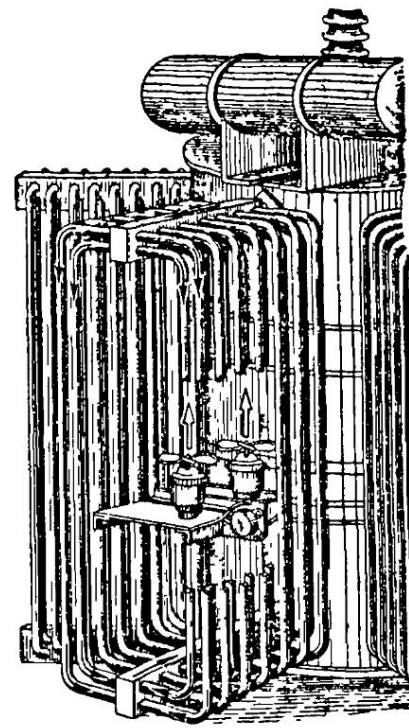
Фиг. 211. Трансформаторы с естественным масляным охлаждением

Витки обмотки, помещенной в масло, хорошо изолируются один от другого. Кроме того, трансформаторное масло, обладая большой теплопроводностью, отнимает тепло от обмоток и отдает его баку. Для увеличения поверхности охлаждения у бака делают ребристую поверхность. Для этой же цели к баку приваривают трубы, сообщающиеся с баком в верхней и нижней частях. Для трансформаторов большой мощности трубы сваривают в отдельные блоки, называемые радиаторами, которые прикрепляют к баку. Крышка трансформатора при помощи болтов крепится к баку.

При работе трансформатора масло, отнимая тепло от обмоток трансформатора, само нагревается и начинает расширяться. При остывании масло сжимается и в свободное от масла пространство может проникнуть воздух, содержащий влагу. Во избежание этого между крышкой и баком прокладывают слой резины, которая не дает воздуху проникать в бак.

При большом объеме масла в баке расширение масла при нагревании может быть настолько большим, что оно станет вытекать из-под крышки. Чтобы дать возможность маслу расширяться, на крышке трансформатора устанавливают дополнительный бачок, называемый *расширителем*. Этот бачок соединяется трубой с баком. При нагреве масло вытесняется в расширитель, а при охлаждении, сокращаясь в объеме, уходит в бак. На расширителе устанавливают масломерную стеклянную трубку для наблюдения за уровнем масла. Так устроены трансформаторы с масляным охлаждением. Трансформаторы небольших мощностей (5—10 *ква*) иногда устраиваются с естественным воздушным охлаждением.

Для лучшего охлаждения трансформаторов с масляным охлажденнем устанавливают воздушные вентиляторы, приводимые в движение электрическими двигателями. Для этой же цели некоторые трансформаторы имеют масляный насос, который гонит нагретое масло из верхней части бака, прогоняет его через змеевик, охлаждаемый проточной водой, и подает остывшее масло в нижнюю часть бака трансформатора. На фиг. 211 показан трансформатор с естественным масляным охлаждением, а на фиг. 212 — часть масляного трансформатора с искусственным воздушным охлаждением (дутьем).



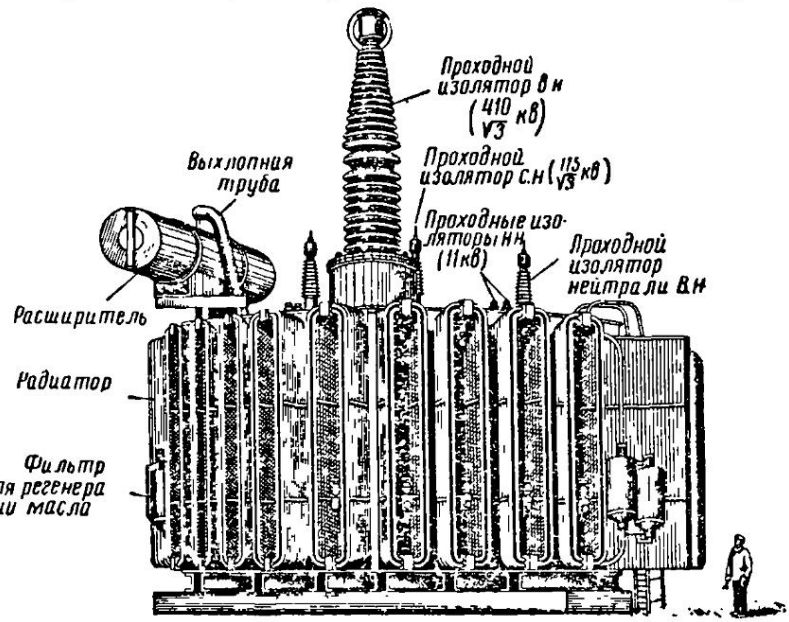
Фиг. 212. Масляный трансформатор с воздушным дутьем

Наблюденне за температурой масла в баке чаще всего осуществляется при помощи термометра, установленного в крышке трансформатора.

До сих пор мы рассматривали трансформаторы, у которых на фазу приходилось две обмотки — *высшего* и *низшего напряжений*. Такие трансформаторы называются *двухобмоточными*. Встречаются трансформаторы, у которых на фазу приходятся одна первичная и две вторичные обмотки. Первичная обмотка является обмоткой высшего напряжения (В. Н.). Вторичные обмотки в зависимости от величины напряжения на их зажимах называются: одна — обмоткой среднего

напряжения (С. Н.) и другая — обмоткой низшего напряжения (Н. Н.). Такие трансформаторы называются трехобмоточными. Напряжения обмоток трехобмоточного трансформатора указываются тройной дробью, например 220/115/10,5 *кв* или 110/35,8/11 *кв*.

На фиг. 213 показан силовой трехобмоточный одиофазный понижающий трансформатор ОДТГ-90 000/400. Обмотка высшего напряжения этого трансформатора выполнена на 400 *кв*, обмотка среднего напряжения — на 110 *кв* и обмотка низшего напряжения — на 11 *кв*. Охлаждение трансформатора осуществляется трубчатыми радиаторами с дополнительным обдувом



Фиг. 213. Одиофазный трехобмоточный трансформатор

радиаторов специальными вентиляторами. Основные данные трансформатора ОДТГ-90 000/400: мощность 90 000 *ква*, номинальные напряжения 400/110/11 *кв*, общий вес 335 *т*, длина 11,27 *м*, ширина 7,61 *м*, высота 12 *м*.

Трансформаторы ОДТГ-90 000/400 установлены на понизительных подстанциях линии электропередачи Куйбышев — Москва.

Мощность группы трех таких однофазных трансформаторов составляет 270 000 *ква*.

В 1929 г. Московский трансформаторный завод (МТЗ) выпустил первую серию трансформаторов мощностью 5 ÷ 560 *ква*.

В конце этого же года МТЗ выпустил трансформаторы 560÷5600 *ква* на 6, 10 и 35 *кв*. В 1933 г. изготовлены трансформаторы мощностью от 3,2 до 31,5 тыс. *ква* и однофазные трансформаторы по 20 тыс. *ква* на 220 *кв*. В 1935 г. были выпущены трехобмоточные трансформаторы на 220/115/10,5 *кв*, в 1937 г. — однофазные трансформаторы на 40 тыс. *ква* и в этом же году первый грозоупорный трансформатор на 26 тыс. *ква*, 154 *кв*. Позднее выпущены трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой: трехфазные до 40 тыс. *ква*, 35 *кв* и однофазные до 20 тыс. *ква*, 110 *кв*. В настоящее время выпускаются трансформаторы на 400 *кв*, мощностью 50, 67, 83 и 90 тыс. *ква* в фазе.

Обозначение типов силовых трансформаторов

О — одиофазный;
Т — трехфазный;
С — с воздушным охлаждением (сухой);
М — масляный с естественным воздушным охлаждением;
Д — масляный с искусственным воздушным охлаждением (дутьем);
Т — трехобмоточный (имеющий одну первичную и две вторичные обмотки на фазу);
Г — грозоупорный (имеющий защиту изоляции от пробоя при ударе молнии);
У — уплотненный (герметизированный).

Цифры, стоящие после буквенных обозначений, показывают: первая цифра (в числителе) — мощность в *ква*, вторая цифра (в знаменателе) — номинальное первичное напряжение в *кв*.

Примеры.

ТС-320/10 — трехфазный трансформатор с воздушным охлаждением (сухой) мощностью 320 *ква*, первичное напряжение 10 *кв*;
ТМ-5600/35 — трехфазный масляный трансформатор с естественным воздушным охлаждением 5600 *ква*, 35 *кв*;
ТМУ-50/6 — трехфазный масляный трансформатор, уплотненный 50 *ква*, 6 *кв*;
ОДТГ-90 000/400 — однофазный масляный трансформатор с искусственным воздушным охлаждением (дутьем), трехобмоточный, грозоупорный, мощностью 90 000 *ква*, 400 *кв*.

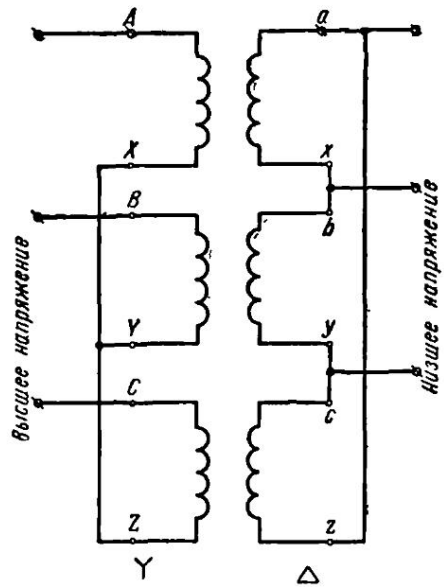
§ 114. Трехфазные трансформаторы

Для трансформации трехфазного тока можно пользоваться однофазными трансформаторами. На фиг. 214 показана схема включения трех однофазных трансформаторов в сеть трехфазного тока. Недостатком этой схемы являются большие затраты трансформаторной стали на сердечники трех трансформаторов.

Если объединить сталь трех сердечников в один общий сердечник, мы получим сердечник трехфазного трансформатора. Затраты трансформаторной стали на трехфазный трансформа-

тор значительно меньше, чем на устройство трех однофазных трансформаторов. На фиг. 215 показан силовой трехфазный трансформатор с естественным масляным охлаждением.

Стандартные схемы соединений обмоток трехфазных трансформаторов показаны на фиг. 216. Расположение выводов на



Фиг. 214. Применение однофазных трансформаторов в сетях трехфазного тока

крышке трансформатора (вид сверху) приведено на фиг. 217. Схемы расположения обмоток трехфазных трансформаторов для двух групп соединений даны на фиг. 218.

Обозначения $Y/Y_0 — 12$ и $Y/\Delta — 11$ указывают схемы и группы соединений обмоток трансформаторов:

Y — соединение звездой;

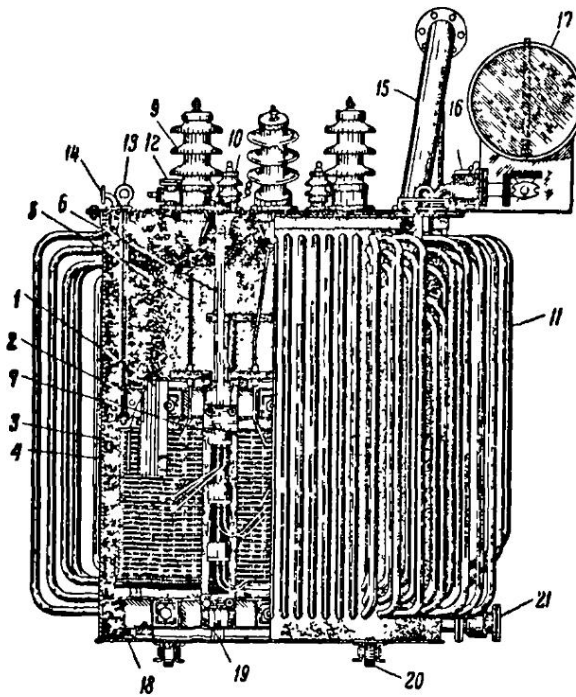
Y_0 — соединение звездой с выводом нулевой точки;

Δ — соединение треугольником.

Начала фазных обмоток высшего напряжения обозначаются латинскими буквами *A, B, C,* низшего напряжения — *a, b, c.* Соответственно концы фазных обмоток обозначаются буквами: *X, Y, Z* и *x, y, z.*

В обозначении $Y/\Delta — 11$ первый значок Y показывает, что обмотка высшего напряжения соединена звездой. Второй зна-

чок Δ показывает, что обмотка низшего напряжения соединена треугольником. Числа 11 и 12 показывают угловое смещение векторов линейных напряжений обмоток высшего и низшего напря-



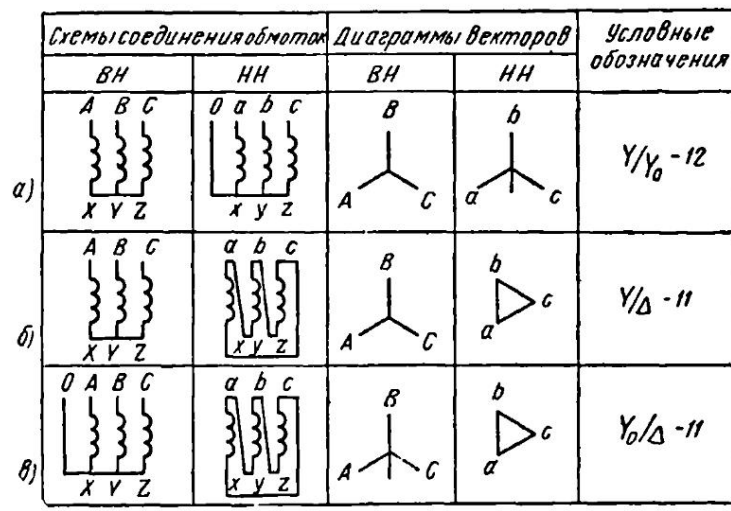
Фиг. 215. Трансформатор с трубчатым баком:
1 — шихтованный магнитопровод, *2* — швеллер, прессующий ярмо, *3* — обмотка низшего напряжения (Н. Н.), *4* — обмотка высшего напряжения (В. Н.), *5* — отводы В. Н., *6* — отводы Н. Н., *7* — встроенный переключатель регулировочных ответвлений обмотки В. Н., *8* — привод переключателя, *9* — ввод (изолятор) В. Н., *10* — ввод (изолятор) Н. Н., *11* — трубчатый бак, *12* — кран для заливки масла, *13* — кольцо для подъема выемной части, *14* — патрубок для присоединения вакуумного насоса, *15* — выхлопная труба, *16* — газовое реле, *17* — расширитель, *18* — упорный угольник на дне бака, *19* — вертикальная шпилька, стягивающая швеллеры, прессующие ярма, *20* — транспортный ролик, *21* — кран для спуска масла

жений. Оно соответствует углу сдвига в сторону вращения стрелки часов между векторами линейных напряжений первичной и вторичной обмоток, принимая за единицу угла угол в 30°. Так, при угле сдвига в 330° группа соединения будет 330 : 30 = 11.

§ 115. Параллельная работа трансформаторов

Если мощность, нужная для трансформации, больше мощности одного трансформатора, то в этом случае несколько трансформаторов включается на параллельную работу.

Параллельная работа одиофазных трансформаторов. Для включения на параллельную работу однофазных трансформаторов необходимо выполнить следующие условия.



Фиг. 216. Схема соединения обмоток трехфазных трансформаторов: *а* — звезда — звезда с выведенной нулевой точкой, *б* — звезда — треугольник, *в* — звезда с выведенной нулевой точкой — треугольник

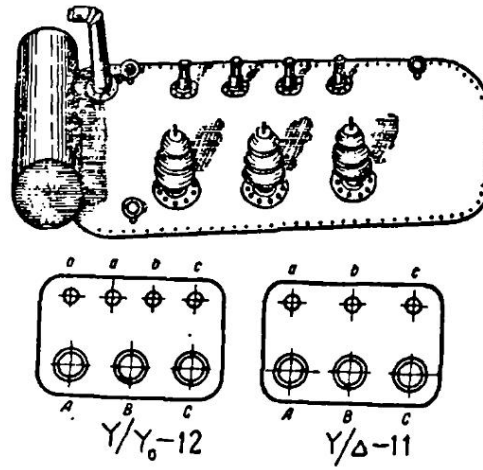
1. Напряжения первичных и вторичных обмоток параллельно включаемых трансформаторов должны быть равны. В этом случае коэффициенты трансформации трансформаторов окажутся также равными. Это условие можно записать так:

$$U_{1I} = U_{1II};$$
$$U_{2I} = U_{2II};$$
$$k_I = k_{II}.$$

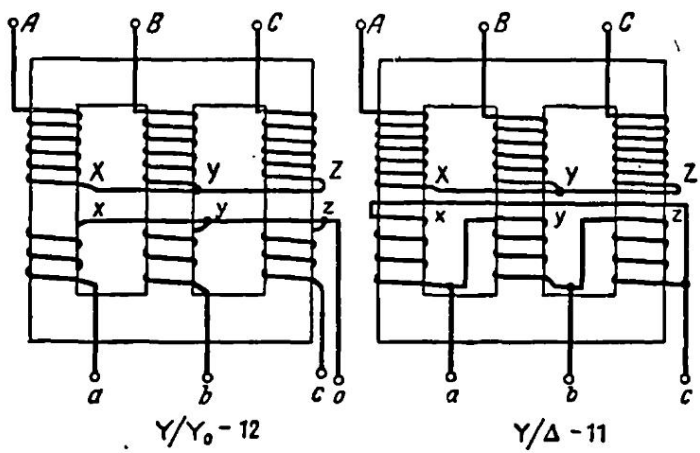
Если на параллельную работу включить трансформаторы с различными коэффициентами трансформации, то вторичные э. д. с. их будут неодинаковы. Но на вторичных шинах не могут быть два различных напряжения. Поэтому разностная э. д. с. E создаст в замкнутом контуре вторичных обмоток ток, который называется уравнительным. При большой разнице в

коэффициентах трансформации уравнительный ток может оказаться настолько большим, что параллельная работа таких трансформаторов окажется невозможной.

При нагрузке трансформаторов с различными коэффициентами трансформации, включенных на параллельную работу, по их обмоткам будет протекать ток, равный геометрической сумме нагрузочного и уравнительного токов. Как показывают вычисления, в этом случае трансформатор с меньшим коэффициентом трансформации будет нагружен больше. Во избежание перегрева необходимо снизить внешнюю нагрузку и поставить перегруженный трансформатор в нормальные условия работы.



Фиг. 217. Вывод концов обмоток на крышку трансформатора (вверху — общий вид крышки с выводами, внизу — схема расположения выводов)



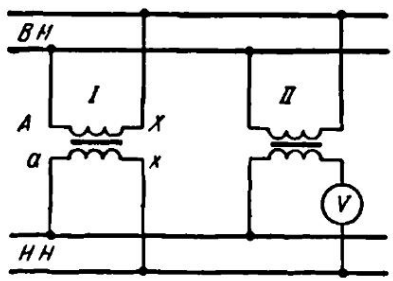
Фиг. 218. Схема расположения обмоток трехфазных трансформаторов

При этом трансформатор с большим коэффициентом трансформации будет недогружен.

На практике приходится иногда включать на параллельную работу трансформаторы с различными коэффициентами трансформации.

По ГОСТ 401—41 на параллельную работу можно включать трансформаторы, если разница в коэффициентах трансформации их не превышает 0,5%.

2. Вторым условием параллельной работы трансформаторов является равенство напряжений короткого замыкания. Расчет показывает, что при параллельной работе трансформаторов с одинаковыми коэффициентами трансформации и с одинаковыми мощностями, но различными напряжениями короткого замыкания U_k нагрузка (ток или полная мощность) распределится между трансформаторами обратно пропорционально U_k : трансформатор с большим U_k возьмет на себя меньшую мощность.



Фиг. 219. Включение на параллельную работу однофазных трансформаторов

На практике разрешается включать на параллельную работу трансформаторы, если их напряжения короткого замыкания отличаются между собой не более чем на ±10% от их среднего значения. Мощности трансформаторов при этом должны отличаться не более чем в три раза.

3. Третьим условием параллельной работы трансформаторов является включение одинаковыми фазами со стороны высшего и низшего напряжений.

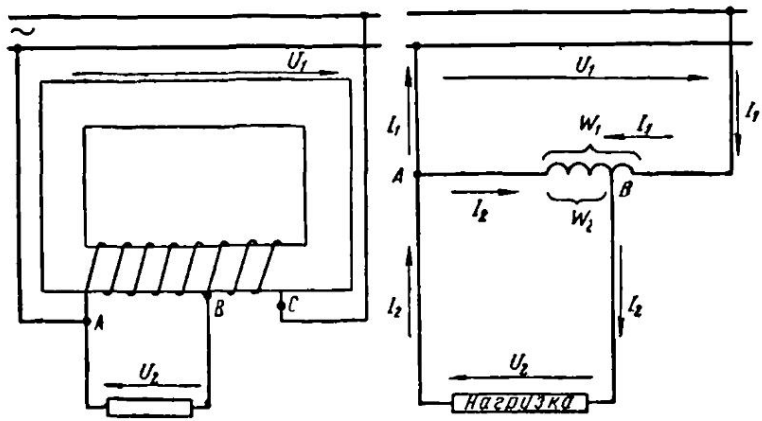
Последнее условие на практике проверяется следующим образом.

Пусть к работающему однофазному трансформатору *I* (фиг. 219) требуется параллельно включить однофазный трансформатор *II*. Трансформатор *II* включают со стороны высшего напряжения, а один из зажимов его вторичной обмотки присоединяют к любой шине низшего напряжения. Между вторым зажимом вторичной обмотки трансформатора *II* и другой шиной низшего напряжения включают вольтметр, рассчитанный на двойное напряжение на низкой стороне трансформаторов. Включать на параллельную работу оба трансформатора можно в том случае, если вольтметр покажет нуль.

Параллельная работа трехфазных трансформаторов. Для включения на параллельную работу трехфазных трансформаторов необходимо выполнить те же условия, что и для включения однофазных трансформаторов. Дополнительным и обязательным условием для включения трехфазных трансформаторов является соблюдение одинаковых групп соединений. Это значит, что трансформатор с группой соединения $Y/Y_0 — 12$ может работать параллельно только с трансформатором такой же группы $Y/Y_0 — 12$.

§ 116. Автотрансформаторы

Автотрансформатор (фиг. 220) представляет собой такой трансформатор, на сердечнике которого имеется только одна обмотка. К различным точкам этой обмотки присоединены одновременно и первичная и вторичная цепи. Магнитный поток автотрансформатора индуктирует электрическую силу в обмотке. Эта электродвижущая сила E почти равна подводимому напряжению U_1.



Фиг. 220. Схема устройства автотрансформаторов

Если э. д. с. E индуктируется в обмотке с числом витков w_1, то в одном витке э. д. с. будет

$$\frac{E}{w_1} \text{ или приближенно } \frac{U_1}{w_1}.$$

Пусть, например, в первичной цепи автотрансформатора (фиг. 220) будет напряжение $U_1 = 800$ *в*. Полное число витков обмотки автотрансформатора между точками A и C, к которым подключена первичная цепь, будет равно 200. Найдем величину э. д. с. на один виток.

$$\frac{U_1}{w_1} = \frac{800}{200} = 4 \text{ в}.$$

Если нам необходимо получить во вторичной цепи напряжение U_2, равное 600 *в*, то мы можем в обмотке найти такие две точки, между которыми будет напряжение 600 *в*.

Если в одном витке обмотки индуктируется 4 *в*, то, для того чтобы получить 600 *в*, необходимо иметь следующее количество витков:

$$w_2 = 600 : 4 = 150 \text{ витков}.$$

Отсчитывая от начала обмотки (точки A) 150 витков, мы присоединяем вторичную цепь между точками A и B.

Здесь можно заметить, что

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

т. е. получаем точно ту же формулу, какую мы имели для обычного трансформатора. Коэффициент трансформации по-прежнему будет

$$k = \frac{U_1}{U_2}.$$

Пример 6. Обмотка автотрансформатора имеет $w_1 = 1200$ витков и включена в сеть напряжением $U_1 = 500$ *в*. Какое напряжение можно получить во вторичной цепи, если между концами ее включено 900 витков?

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

$$U_2 = \frac{U_1 w_2}{w_1} = \frac{500 \cdot 900}{1200} = 375 \text{ в}.$$

Под влиянием напряжения U_1 в первичной обмотке автотрансформатора с числом витков w_1 протекает ток I_1 (фиг. 220). Напряжение на зажимах вторичной цепи равно U_2. При замкнутой вторичной цепи в ней будет проходить ток I_2. Как и всякий индуктированный ток, ток I_2 направлен, по правилу Ленца, так, что он стремится противодействовать вызвавшей его причине, т. е. он направлен против тока I_1.

Следовательно, на общей части витков A — B обмотки трансформатора протекает геометрическая разность токов I_1 и I_2.

В приближенных расчетах геометрическую сумму заменяют арифметической разностью и пишут:

$$I = I_2 - I_1.$$

Коэффициент полезного действия автотрансформатора очень высок и поэтому практически можно считать мощность первичной цепи равной мощности вторичной цепи.

Пример 7. Автотрансформатор включен в сеть напряжением $U_1 = 400$ *в*. Ток $I_1 = 30$ *а*. Во вторичной цепи напряжение $U_2 = 300$ *в*. Требуется определить ток I_2 (фиг. 220).

Сначала определяем мощность первичной цепи P_1,

$$S_1 = I_1 U_1 = 30 \cdot 400 = 12\,000 \text{ ва} = 12 \text{ ква}.$$

Пренебрегая незначительными потерями в автотрансформаторе, получаем мощность вторичной цепи 12 *ква*. При условии, что вторичная цепь не содержит индуктивности, ток I_2 будет равен:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12\,000}{300} = 40 \text{ а}.$$

По общей части витков A—B течет разность токов I_2 и I_1:

$$I = I_2 - I_1 = 40 - 30 = 10 \text{ а}.$$

Следовательно, на участке $A-B$ сечение провода для обмотки можно взять меньше чем в остальной части обмотки. При этих условиях обычный трансформатор для понижения напряжения с 400 до 300 *в* имел бы две обмотки, т. е. большой расход меди и большую стоимость.

Если в нашем примере вторичное напряжение U_2 вместо 300 *в* будет 350 *в*, т. е. не намного отличающимся от первичного напряжения, то вторичный ток будет:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12\,000}{350} = 34{,}3 \text{ а}.$$

В этом случае на участке $A-B$ потечет еще меньший ток:

$$I = I_2 - I_1 = 34{,}3 - 30 = 4{,}3 \text{ а}$$

и сечение провода обмотки на участке $A-B$ можно взять еще меньшим. Из этого можно сделать вывод, что чем меньше вторичное напряжение отличается от первичного, тем больше преимущество автотрансформатора перед обычным трансформатором.

Попробуем изменить вторичное напряжение U_2 с 300 на 200 *в*. Сейчас вторичное напряжение будет в два раза меньше первичного. Вторичный ток будет:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12\,000}{200} = 60 \text{ а}.$$

Ток на участке $A-B$ будет:

$$I = I_2 - I_1 = 60 - 30 = 30 \text{ а},$$

т. е. такой же, как и ток I_1. Следовательно, сечение провода для всей обмотки должно быть одинаковым.

Попробуем еще уменьшить вторичное напряжение U_2 до 100 *в*. Теперь оно будет отличаться более чем в два раза от первичного напряжения:

$$I_2 = \frac{S_2}{U_2} = \frac{12\,000}{100} = 120 \text{ а}.$$

Ток на участке $A-B$ в этом случае будет:

$$I = I_2 - I_1 = 120 - 30 = 90 \text{ а}.$$

Теперь сечение проводов в обмотке на участке $A-B$ придется увеличивать по сравнению с участком $B-C$. В этом случае может оказаться более выгодным поставить обычный трансформатор.

Пример 8. Автотрансформатор имеет обмотку, состоящую из 1500 витков и включенную в сеть напряжением 500 *в*. Вторичная цепь имеет 1200 витков и замкнута на безындукционное сопротивление 100 *ом*. Определить ток, потребляемый автотрансформатором из сети, если к. п. д. = 95%. Найти, на какой ток должны быть рассчитаны участки $A-B$ и $B-C$ (фиг. 220).

Вторичное напряжение U_2 находим из формулы:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

откуда

$$U_2 = \frac{U_1 \cdot w_2}{w_1} = \frac{500 \cdot 1200}{1500} = 400 \text{ в}.$$

Вторичный ток будет:

$$I_2 = \frac{U_2}{r} = \frac{400}{100} = 4 \text{ а}.$$

Мощность вторичной цепи при $\cos \varphi_2 = 1$:

$$P_2 = I_2 \cdot U_2 = 4 \cdot 400 = 1600 \text{ вт}.$$

Мощность первичной цепи с учетом к. п. д. автотрансформатора

$$P_1 = \frac{P_2}{\text{к. п. д.}} = \frac{1600}{0{,}95} \approx 1685 \text{ вт.}$$

Ток первичной цепи, потребляемый автотрансформатором из сети,

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{1685}{500} = 3{,}37 \text{ а.}$$

Ток на участке B—C равен 3,37 $а$, а на участке A—B

$$I = I_2 - I_1 = 4 - 3{,}37 = 0{,}63 \text{ а.}$$

Наряду с понижающими встречаются также повышающие автотрансформаторы (фиг. 221). В них вторичное напряжение U_2 больше первичного U_1, и ток на общем участке обмоток (приближенно)

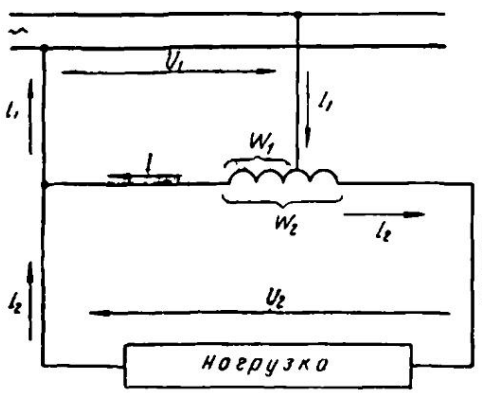
$$I = I_1 - I_2.$$

Коэффициент трансформации повышающего автотрансформатора всегда меньше единицы:

$$k = \frac{U_1}{U_2}.$$

В трехфазных сетях употребляются трехфазные автотрансформаторы (фиг. 222).

Автотрансформаторы нашли себе применение там, где имеется небольшая разница между первичным и вторичным напряжением, т. е. когда коэффициент трансформации близок к единице и во всяком случае не превышает двух. В этом случае автотрансформаторы дешевле, легче и экономичнее обычных трансформаторов. Но когда вторичное напряжение значительно отличается от первичного, то автотрансформатор в отношении экономии металла и безопасности теряет свои преимущества. Так как в автотрансформаторе цепи обмоток высшего и низшего напряжений соединены электрически, то изоляция цепи низшего напряжения должна быть выполнена так же, как изоляция цепи высшего напряжения.



Фиг. 221. Повышающий автотрансформатор

Задачи для самостоятельного решения

1. Однофазный трансформатор включен в сеть 220 $в$. Первичная обмотка трансформатора имеет 800 витков, вторичная — 46 витков. Определить коэффициент трансформации и напряжение вторичной обмотки.

2. Вторичная обмотка трансформатора, указанного в предыдущей задаче, дает ток 8 *а* для ламп накаливания. Определить ток, потребляемый трансформатором из сети, если к. п. д. его равен 90%.

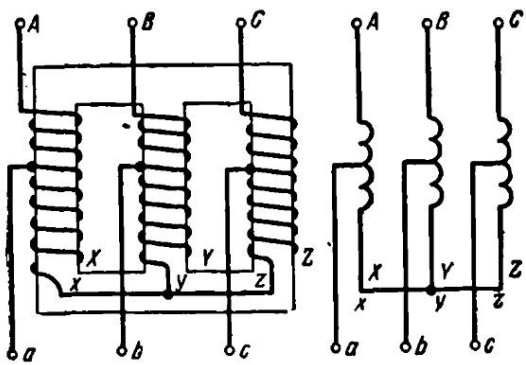
3. Катушка с активным сопротивлением 3 *ом* и индуктивным сопротивлением 20 *ом* включена на зажимы трансформатора при напряжении 24 *в*. Трансформатор включен в сеть 120 *в*; к. п. д. трансформатора 92%. Определить ток, потребляемый трансформатором из сети.

4. Вторичная обмотка трехфазного трансформатора дает мощность 30 *ква*; к. п. д. трансформатора 95% и включен он в сеть 3000 *в*. Определить ток первичной обмотки.

5. Обмотка понижающего однофазного автотрансформатора имеет 800 витков и включена под напряжение 450 *в*. В каком месте нужно сделать ответвление и для вторичной цепи, чтобы понизить напряжение до 300 *в*?

6. Полезная мощность автотрансформатора, указанного в предыдущей задаче, равна 2 *квт*; к. п. д. 93%. Определить первичный ток и ток, протекающий в общей части витков.

7. Автотрансформатор имеет к. п. д. 96% и включен в сеть 120 *в*. Во вторичной цепи его при безындукционной нагрузке протекает ток 8 *а* при напряжении 150 *в*. Определить токи в первичной цепи и на общей части витков.



Фиг. 222. Трехфазный автотрансформатор: слева — схема устройства, справа — электрическая схема

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип работы трансформатора.
2. Описать устройство трансформатора.
3. Для чего нужны трансформаторы?
4. Что называется коэффициентом трансформации трансформатора и как его определить?
5. Как делятся трансформаторы в зависимости от конструкции магнитопровода (сердечника), от способа охлаждения?
6. Как соединяются обмотки трехфазных трансформаторов?
7. Почему при увеличении нагрузки трансформатора увеличивается ток первичной обмотки?
8. Как устроены, работают и для чего служат автотрансформаторы?

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

§ 117. Общие положения

Асинхронной машиной называется машина переменного тока, у которой скорость вращения ротора меньше скорости вращения магнитного поля статора и зависит от нагрузки. Асинхронная машина, как и другие электрические машины, обладает свойством обратимости, т. е. она может работать как в режиме двигателя, так и в режиме генератора.

Трехфазный асинхронный двигатель был изобретен русским инженером М. О. Доливо-Добровольским в 1890 году и с тех пор, подвергаясь усовершенствованиям, прочно занял свое место в промышленности и получил массовое распространение во всех странах мира.

М. О. Доливо-Добровольский (1862—1919) обогатил русскую науку изобретениями и открытиями, имеющими мировое значение. Он является основоположником техники трехфазного тока, изобретателем трехфазного асинхронного электродвигателя, трехфазного трансформатора, делителя напряжения и фазометра, руководителем и строителем первой в мире трехфазной линии передачи электрической энергии Лауфен — Франкфурт-на-Майне (Германия) длиной около 170 *км* при линейном напряжении 15 000 *в* (1891 г.).

Асинхронный двигатель имеет две основные части — статор и ротор. Статором называется неподвижная часть машины. С внутренней стороны статора сделаны пазы, куда укладывается трехфазная обмотка, питаемая трехфазным переменным током Вращающаяся часть машины называется ротором, в пазах его также уложена обмотка. Статор и ротор собираются из отдельных штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,35 и 0,5 *мм*. Отдельные листы стали изолируются один от другого слоем лака. Воздушный зазор между статором и ротором делается возможно малым (0,3—0,35 *мм* в машинах малой мощности и 1,—1,5 *мм* в машинах большой мощности).

В зависимости от конструкции ротора асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым и с фазным роторами.

Асинхронные двигатели делятся на бесколлекторные

и коллекторные. Наибольшее распространение получили бесколлекторные двигатели. Они применяются там, где требуется приблизительно постоянная скорость вращения и не требуется ее регулировка. Бесколлекторные двигатели просты по устройству, безотказны в работе и имеют высокий к. п. д.



М. О. Доливо-Добровольский

Для получения широкой регулировки скорости и придания некоторых специальных свойств асинхронной машине применяются однофазные и трехфазные коллекторные асинхронные машины. Однако вследствие дороговизны, сложной конструкции, тяжелых условий работы асинхронные коллекторные машины мало применяются и нами рассматриваться не будут. Поэтому в дальнейшем, говоря об асинхронных двигателях, мы будем иметь в виду бесколлекторные асинхронные двигатели.

§ 118. Принцип действия асинхронного двигателя

Подключим обработку статора к сети трехфазного переменного тока. Внутри статора возникает вращающееся магнитное поле. Магнитные линии поля будут пересекать обмотку неподвижного

тока ротора и индуктировать в ней э. д. с. E_2, частота которой f_2 равна частоте тока f_1 в обмотке статора.

Э. д. с., индуктированная в фазе обмотки ротора, определяется по формуле:

$$E_{2s} = 4{,}44 k_2 f_2 w_2 \Phi_m,$$

где $k_2 < 1$ — обмоточный коэффициент, учитывающий уменьшение э. д. с. ротора вследствие геометрического сложения э. д. с., наводимых в отдельных его проводах, и укорочения шага обмотки ротора;

f_2 — частота тока в обмотке ротора;

w_2 — число витков обмотки фазы ротора;

Φ_m — максимальное значение магнитного потока статора.

Под действием э. д. с. E_{2s} в обмотке ротора будет протекать ток I_2, величину которого можно определить по формуле:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{z_{2s}} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}},$$

где r_2 — активное сопротивление фазной обмотки ротора;

x_{2s} — индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки.

Индуктивное сопротивление рассеяния x_{2s} зависит от частоты тока и определяется по формуле:

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_{2s},$$

где L_{2s} — индуктивность рассеяния фазы обмотки ротора.

В момент пуска, когда ротор еще неподвижен, частота тока в обмотке ротора наибольшая ($f_2 = f_1$) и поэтому индуктивное сопротивление x_{2s} имеет наибольшее значение. Так как э. д. с. E_2, индуктированная в обмотке ротора в момент пуска, имеет максимальное значение, то ток в обмотке ротора I_2 в этот момент превышает величину номинального тока двигателя в 2—7 раз. Токи ротора, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем статора, создают вращающий момент, под действием которого ротор начинает вращаться в сторону вращения поля статора. В этом заключается принцип действия асинхронного двигателя.

Очевидно, что ротор при своем вращении не может догнать вращающееся магнитное поле статора. Если предположить, что ротор будет иметь такую же скорость вращения, как и магнитное поле статора, то токи в обмотке ротора исчезнут. С исчезновением токов в обмотке ротора прекратится взаимодействие их с полем статора и ротор станет вращаться медленнее вращающегося поля статора. Однако при этом обмотка ротора вновь начнет пересекаться вращающимся полем статора и на

ротор снова будет воздействовать вращающий момент. Следовательно, ротор при своем вращении всегда должен отставать от скорости вращения магнитного поля статора, т. е. вращаться асинхронно (не в такт с магнитным полем), почему эти двигатели и получили название асинхронных.

Если через n_1 обозначить скорость вращения вращающегося магнитного поля статора (синхронная скорость), а через n_2 — скорость вращения ротора двигателя, то скорость его относительно вращающегося поля статора будет равна разности:

$$n_1 - n_2.$$

Число, показывающее, во сколько раз относительная скорость ротора меньше скорости вращающегося магнитного поля статора, называется скольжением двигателя и обозначается буквой s.

Таким образом, скольжение будет равно:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

откуда

$$n_2 = n_1 (1 - s).$$

Если, например, магнитное поле делает 1500, а ротор 1450 *об/мин*, то скольженне будет:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1500-1450}{1500} = 0{,}033 = 3{,}3\,\%.$$

В момент пуска двигателя, когда скорость ротора $n_2 = 0$, скольжение будет:

$$s = \frac{n_1}{n_1} = 1, \text{ или } 100\,\%.$$

При холостом ходе $n_2 \approx n_1$ и поэтому скольжение будет:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx 0.$$

Скольжение асинхронного двигателя в зависимости от нагрузки меняется незначительно.

Чем больше мощность двигателя, тем меньше его скольжение.

Пример. Определить скольжение в процентах для шестиполюсного асинхронного двигателя, если ротор его делает 960 *об/мин*.

$$n_1 = \frac{f_1 60}{p},$$

если $f_1 = 50$ *гц*, то

$$n_1 = \frac{50 \cdot 60}{3} = 1000 \text{ об/мин};$$

тогда скольжение

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0{,}04, \text{ или } 4\%.$$

Таким образом, асинхронная машина, работая в режиме двигателя, изменяет скорость вращения от $n = 0$ (момент пуска) до $n \approx n_1$ (холостой ход) и, соответственно, скольжение от $s = +1$ до $s = 0$.

При номинальной нагрузке двигателя малой мощности их скольжение бывает равно 3—6%, а двигателей большой мощности — 1—3%.

С изменением скорости вращения двигателя изменяется частота э. д. с. и токов в обмотке ротора, что видно из уравнения

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{pn_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s.$$

При пуске двигателя

$$s = 1;\ f_2 = f_1;$$

при холостом ходе

$$s \approx 0;\ f_2 \approx 0.$$

Например, если $f_1 = 50$ *гц*, то при пуске $f_2 = 50$ *гц*. При скольжении $s = 2\%$ частота тока в роторе

$$f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0{,}02 = 1 \text{ гц}.$$

Величина э. д. с., индуктированной в обмотке ротора, как было показано выше, равна:

$$E_{2s} = 4{,}44 f_2 w_2 k_2 \cdot \Phi_m.$$

Так как $f_2 = f_1 s$, то величина э. д. с. E_{2s} при определенном скольжении выразится формулой:

$$E_{2s} = 44{,}4 f_1 s w_2 k_2 \Phi_m = E_2 s,$$

где E_2 — э. д. с. в фазе обмотки ротора в момент пуска (когда $f_2 = f_1$).

Индуктивное сопротивление, зависящее от частоты, при определенном скольжении s определится так:

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_{2s} = 2\pi f_1 s L_{2s},$$

где $2\pi f_1 s L_{2s}$ — индуктивное сопротивление обмотки ротора в момент пуска.

Рассмотрев работу асинхронного двигателя, проведем аналогию между ними и трансформатором. Как двигатель, так и трансформатор имеет две обмотки, между которыми существует магнитная связь. Роль первичной обмотки трансформатора выполняет в двигателе обмотка статора, роль вторичной — обмотка ротора. В момент пуска (или при заторможенном роторе) обе обмотки неподвижны и частота токов в обеих обмотках одинакова. Изменение режима работы вторичной обмотки трансформатора отражается на работе его первичной обмотки. Такая же картина наблюдается при работе асинхронного двигателя.

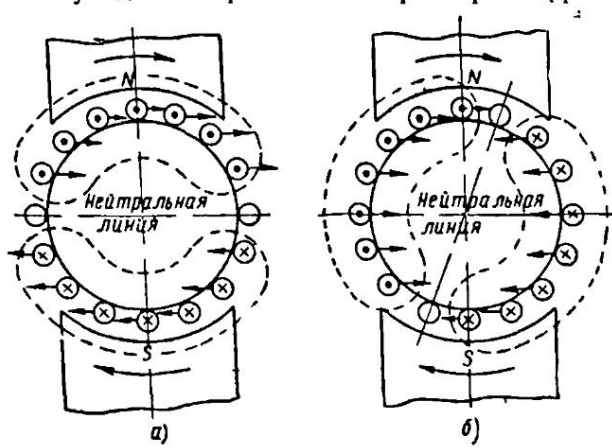
Увеличение нагрузки на валу двигателя вызывает увелнчеиие тока в обмотке ротора. Благодаря магнитной связи между обмотками ротора и статора увеличение тока в обмотке ротора вызывает увеличеиие тока в обмотке статора. Следовательно, по амперметру, включенному в цепь статора, можно судить о нагрузке двигателя.

Разница между асинхронным двигателем и трансформатором заключается в конструкции магнитной цепи. У двигателя первичная и вторичная цепи разделены воздушным промежутком. чего не бывает у трансформаторов обычной конструкции. При работе двигателя ротор вместе с его обмоткой находятся во вращении. Частота э. д. с. и тока ротора меняется с нагрузкой двигателя, чего не бывает у трансформатора.

§ 119. Вращающий момент асинхронного двигателя

На величину вращающего момента асинхроиного двигателя большое влияние оказывает сдвиг фаз между током I_2 и э. д. с. E_{2s} ротора.

Рассмотрим случай, когда индуктивность обмотки ротора мала и поэтому сдвигом фаз можно пренебречь (фиг. 223, *а*).



Фиг. 223. Зависимость вращающего момента от сдвига фаз между током и э. д. с. ротора

Вращающееся магнитное поле статора здесь заменено полем полюсов N и S, вращающихся, предположим, по направлению часовой стрелки. Пользуясь правилом правой руки, определяем направление э. д. с. и токов в обмотке ротора. Токи ротора, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создают момент вращеиия. Направления сил, действующих на проводники с током, определяются по правилу левой руки. Как видно

из чертежа, ротор под действием сил будет вращаться в ту же сторону, что и само вращающееся поле, т. е. по часовой стрелке.

Рассмотрим второй случай, когда индуктивность обмотки ротора велика. В этом случае сдвиг фаз между током ротора I_2 и э. д. с. ротора E_{2s} будет также большим. На фиг. 223, *б* магнитное поле статора асинхроиного двигателя по-прежнему показано в виде вращающихся по направлению часовой стрелки полюсов N и S. Направление индуктированной в обмотке ротора э. д. с. остается таким же, как и на фиг. 223, *а*, но вследствие запаздывания тока по фазе ось магнитного поля ротора не будет уже совпадать с нейтральной линией поля статора, а сместится на некоторый угол против вращения магнитного поля. Это приведет к тому, что наряду с образованием вращающего момента, направлениого в одну сторону, некоторые проводники создадут встречный вращающий момент.

Отсюда видно, что общий вращающий момент двигателя при сдвиге фаз между током и э. д. с. ротора меньше, чем для случая, когда I_2 и E_{2s} совпадают по фазе. Можно доказать, что вращающий момент асинхронного двигателя обусловливается только активной слагающей тока ротора, т. е. током $I_2 \cos \psi_2$ и что он может быть вычислен по формуле:

$$M_{вр} = c\Phi_m I_2 \cos \psi_2,$$

где

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{z_{2s}};$$

$$\cos \psi_2 = \frac{r_2}{z_{2s}};$$

Φ_m — магнитный поток статора (а также приближенно равный результирующему магнитному потоку асинхронного двигателя);

ψ_2 — угол сдвига фаз между э. д. с. и током фазы обмотки ротора;

c — постоянный коэффициент.

После подстановки:

$$M_{вр} = c\Phi_m \frac{E_{2s}}{z_{2s}} \cdot \frac{r_2}{z_{2s}} = c_1 \Phi_m \frac{E_{2s} r_2}{z_{2s}^2}.$$

Но так как

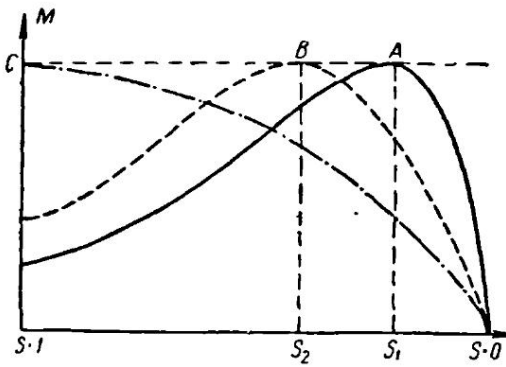
$$z_{2s}^2 = r_2^2 + (2\pi f_2 L_{2s})^2 = r_2^2 + (2\pi s f_1 L_{2s})^2,$$

формулы момента можно представить в следующем окончательном виде:

$$M_{вр} = c_2 \frac{s r_2}{r_2^2 + (2\pi f_1 s L_{2s})^2}.$$

Из последнего выражения видно, что вращающий момент асинхронного двигателя зависит от скольжения.

На фиг. 224 изображена кривая A зависимости вращающего момента двигателя от скольжения. Из кривой видно, что в момент пуска, когда $s=1$ и $n=0$, вращающий момент двигателя невелик. Это объясняется тем, что в момент пуска частота тока в обмотке ротора наибольшая и индуктивное сопротивление обмотки велико. Вследствие этого $\cos\psi_2$ имеет малое значение (порядка 0,1—0,2). Поэтому, несмотря на большую величину пускового тока, пусковой вращающий момент будет небольшим.



Фиг. 224. Зависимость вращающего момента от скольжения двигателя

При некотором скольжении s_1 вращающий момент двигателя будет иметь максимальное значение. При дальнейшем уменьшении скольжения или, иначе говоря, при дальнейшем увелнчении скорости вращения двигателя его момент будет быстро уменьшаться и при скольжении $s=0$ момент вращения двигателя будет также равен нулю.

Следует оговориться, что у асинхронного двигателя скольжение, равное нулю, практически быть не может. Это возможно лишь в том случае, если ротору сообщить извне вращающий момент в сторону вращения поля статора.

Пусковой момент можно увеличить, если в момент пуска уменьшить сдвиг фаз между током и э. д. с. ротора. Из формулы

$$\operatorname{tg}\psi_2=\frac{x_{2s}}{r_2}$$

видно, что если при постоянном индуктивном сопротивлении обмотки ротора увеличить активное сопротивление, то $\operatorname{tg}\psi_2$ и сам угол ψ_2 будут уменьшаться, что приведет к тому, что $\cos\psi_2$ и вращающий момент двигателя станут больше. Этим пользуются на практике для увеличения пускового вращающего момента двигателя. В момент пуска в цепь ротора вводят активное сопротивление (пусковой реостат), которое затем выводят, как только двигатель увеличит скорость.

Увеличение пускового момента приводит к тому, что максимальный вращающий момент двигателя получается при большем скольжении (точка s_2 кривой B на фиг. 224). Путем увеличения

активного сопротивления цепи ротора при пуске можно добиться того, что максимальный вращающий момент будет в момент пуска ($s = 1$ кривой C).

Вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален квадрату напряжения, поэтому даже небольшое уменьшение напряжения сопровождается резким уменьшением вращающего момента.

Мощность P_1, подводимая к обмотке статора асинхронного двигателя, равна:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

где m_1 — число фаз.

В статоре двигателя имеются следующие потери энергии:

1) в обмотке статора $P_{эс} = m_1 I^2_1 r_1$;

2) в стали статора на гистерезис и вихревые токи $P_с$.

Мощность, подводимая к ротору, представляет собой мощность вращающегося магнитного поля, называемую также **электромагнитной мощностью** $P_{эм}$.

Электромагнитная мощность равна разности между подводимой к двигателю мощностью и потерями в статоре двигателя, т. е.

$$P_{эм} = P_1 - (P_с + P_{эс}).$$

Мощность $P_{эм}$ может быть выражена также в виде соотношения

$$P_{эм} = \omega_1 M,$$

где ω_1 = угловая скорость вращения магнитного потока статора, равная $\frac{2\pi n_1}{60}$;

M — момент вращения в джоулях, развиваемый магнитным потоком.

Механическая мощность, развиваемая ротором двигателя, будет

$$P'_2 = \omega_2 M,$$

где ω_2 — угловая скорость вращения ротора, равная $\frac{2\pi n_2}{60}$.

Разность между $P_{эм}$ и P_2' представляет собой электрические потери в обмотке ротора $P_{эр}$, если пренебречь потерями в стали ротора в виду их незначительности (частота перемагничивания ротора обычно очень мала):

$$P_{эр} = P_{эм} - P'_2 = m_2 r_2 I^2_2.$$

Скольжение двигателя равно:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1},$$

откуда

$$s_1 \omega = \omega_1 - \omega_2.$$

Мощность $P_{эр}$ можно выразить иначе:

$$P_{эр} = P_{эм} - P'_2 = M\omega_1 - M\omega_2 = M(\omega_1 - \omega_2) = M\omega_1 s = sP_{эм}.$$

Следовательно, потери в обмотке ротора пропорциональны скольжению ротора.

Если из механической мощности P_2', развиваемой ротором, вычесть механические потери $P_{мх}$, обусловленные трением в подшипниках ротора, трением о воздух и т. п., а также добавочные потери $P_{дд}$ возникающие при на-

грузке и обусловленные полями рассеяния ротора, и потери, вызываемые пульсациями магнитного поля в зубцах статора и ротора, то останется полезная мощность на валу двигателя, которую обозначим через P_2.

К. п. д. асинхронного двигателя может быть определен по формуле:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - (P_{мх} + P_c + P_{эс} + P_д + P_{эр})}{P_1}.$$

Выше было найдено выражение вращающего момента асинхронного двигателя. Получим то же выражение иным путем.

Электромагнитная мощность $P_{эм}$ может быть выражена такой формулой:

$$P_{эм} = m_1 E_2' I_2' \cos \psi_2 = m_2 E_{2s} I_2 \cos \psi_2,$$

где E_2' — э. д. с. ротора, приведенная к статору и равная

$$E_2' = E_2 \frac{w_1 k_1}{w_2 k_2},$$

где w_1 — число витков обмотки фазы статора;
w_2 — число витков обмотки фазы ротора;
k_1 — обмоточный коэффициент обмотки статора;
k_2 — обмоточный коэффициент обмотки ротора;
I_2' — ток ротора, приведенный к статору и равный

$$I_2' = I_2 \frac{m_2 w_2 k_2}{m_1 w_1 k_1};$$

ψ_2 — угол сдвига фаз между фазным током ротора и его э. д. с.

Выше было найдено выражение для э. д. с. ротора:

$$E_{2s} = 4{,}44 k_2 s f_1 w_2 \Phi_m.$$

Подставляя значение E_{2s} при $s=1$ в формулу $P_{эм}$, получим:

$$P_{эм} = 4{,}44 m_2 k_2 f_1 w_2 I_2 \Phi_m \cos \psi_2 = \omega_1 M,$$

откуда

$$M = \frac{4{,}44 m_2 k_2 f_1 w_2}{\omega_1} \Phi_m I_2 \cos \psi_2.$$

Обозначая часть этого выражения через постоянное число

$$c_э = \frac{4{,}44 m_2 k_2 f_1 w_2}{\omega_1},$$

получим:

$$M = c_э \Phi_m I_2 \cos \psi_2.$$

Из последнего выражения видно, что момент вращения асинхронного двигателя пропорционален произведению из величины вращающегося магнитного потока, тока ротора и косинуса угла между э. д. с. ротора и его током.

Из формулы $P_{эр} = M \omega_1 s$ имеем:

$$M = \frac{P_{эр}}{\omega_1 s} = \frac{m_2 I_2^2 r_2}{\omega_1 s} = \frac{m_1 I_2'^2 r_2'}{\omega_1 s}$$

Последнее выражение показывает, что вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален джоулевым потерям ($I_2^2 r_2$) в обмотке ротора.

Из схемы замещения асинхронного двигателя получается величина приведенного тока ротора, которую мы приводим без доказательства:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + c_1\frac{r_2'}{s}\right)^2 + \left(x_1 + c_1 x_2'\right)^2}},$$

где r_1 — активное сопротивление обмотки статора;
x_1 — индуктивное сопротивление обмотки статора;
r_2' — активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору;
x_2' — индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к статору;
c_1 — коэффициент, равный 1,02—1,05.

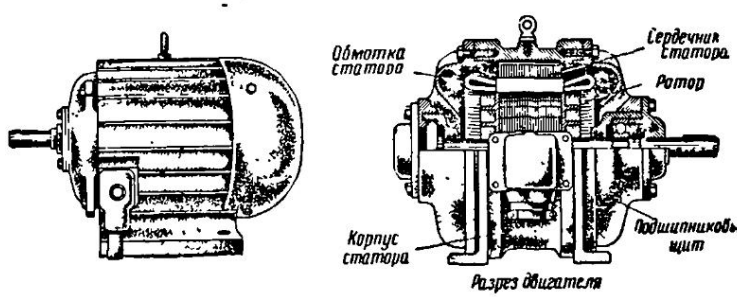
Подставляя выражение приведенного тока ротора в последнюю формулу вращающего момента, получим:

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2'}{s\omega_1\left[\left(r_1 + c_1\frac{r_2'}{s}\right)^2 + \left(x_1 + c_1 x_2'\right)^2\right]}.$$

Уравнение вращающего момента показывает, что момент двигателя пропорционален квадрату напряжения U_1^2.

§ 120. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (фиг. 225, 226) является самым распространенным из электрических двигателей, применяемых в промышленности.

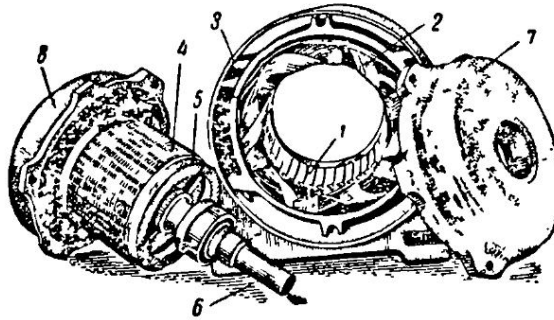


Фиг. 225. Общий вид и разрез асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Устройство асинхронного двигателя следующее. На неподвижной части двигателя — статоре *1* (фиг. 226) размещается трехфазная обмотка *2*, питаемая трехфазным током. Начала трех фаз этой обмотки выводятся на общий щиток, укрепленный снаружи на корпусе *3* двигателя.

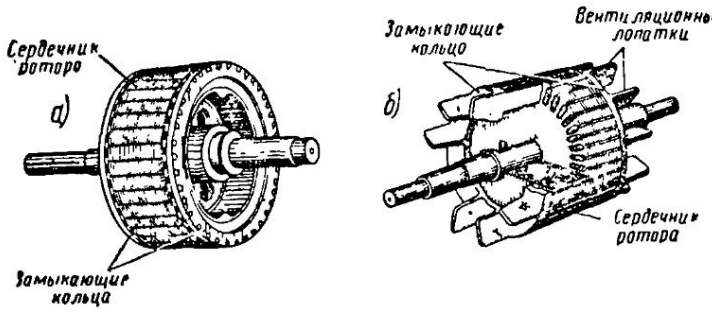
Так как в обмотках статора протекает переменный ток, то по стали статора будет проходить переменный магнитный поток. Для уменьшения вихревых токов, возникающих в статоре, его делают из отдельных штампованных листов легированной стали

толщиной 0,35 и 0,5 *мм*. Отдельные листы изолируют один от другого лаком. Листы с выштампованными пазами для обмотки стягивают между собой болтами, изолированными от статора. Собранный сердечник статора укрепляют в чугунном корпусе *3* двигателя.



Фиг. 226. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде

Вращающуюся часть двигателя — ротор *4* собирают также из отдельных листов стали. В пазы ротора закладывают медные стержни, которые с двух сторон припаивают к медным кольцам *5*.



Фиг. 227. Внешний вид и частичный разрез короткозамкнутого ротора:

а — ротор с обмоткой «беличье колесо», *б* — короткозамкнутый ротор, залитый алюминием

Если представить себе одну обмотку такого ротора, то она по внешнему виду будет напоминать «беличье колесо» (фиг. 227, *а*).

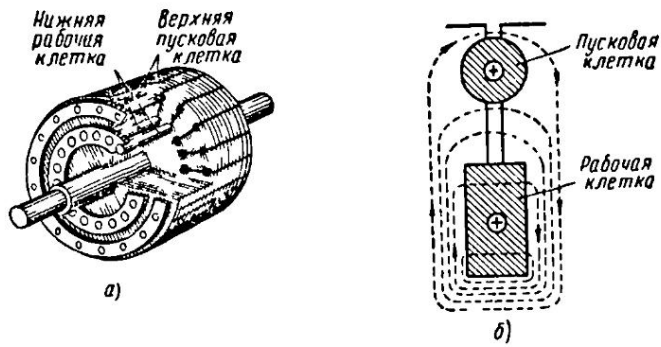
В настоящее время у всех двигателей мощностью до *100 квт* «белнчье колесо» делается из алюминия путем заливки его под давлением в пазы ротора (фиг. 227, *б*).

Вал *6* ротора (фиг. 226) вращается в подшипниках, закрепленных в подшипниковых щитах *7* и *8*. Щиты при помощи бол-

тов крепятся к корпусу двигателя. На один конец вала ротора насаживается шкив для передачи вращения рабочим машинам или станкам. Пуск двигателя с короткозамкнутым ротором очень прост. Для этого нужно при помощи рубильника (или другого пускового приспособления) включить обмотку статора под напряжение, и ротор начнет вращаться. При пуске двигатель с короткозамкнутым ротором берет из сети пусковой ток в 5—7 раз больший, чем ток, который потребляет двигатель при нормальной работе (номинальный ток).

Большие пусковые токи двигателей вызывают большое падение напряжения в сети, что вредно отражается на работе других потребителей.

В момент пуска, когда частота тока ротора равна частоте тока статора, индуктивное сопротивление роторной обмотки велико, угол сдвига фаз ψ_2 между э. д. с. E_{2s} и током ротора I_2 также велик. Поэтому пусковой вращающий момент двигателя будет небольшим. Выше было указано, что путем увеличения



Фиг. 228. Двухклеточный ротор:
а — общий вид ротора с частичным разрезом, *б* — разрез паза

активного сопротивления цепи роторной обмотки можно увеличить вращающий момент двигателя. Можно было бы сделать роторную обмотку большего сопротивления, но это вызвало бы большой нагрев обмотки и уменьшение к. п. д. двигателя. Для улучшения пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором применяют двигатели с двумя короткозамкнутыми обмотками на роторе и двигатели с глубоким пазом.

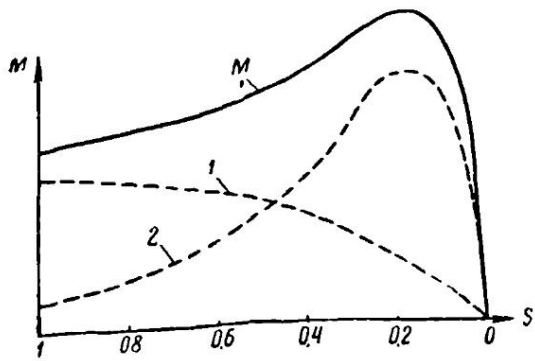
Двигатель с двумя клетками (короткозамкнутыми обмотками) был предложен Доливо-Добровольским. На роторе такого двигателя помещают две клетки (фиг. 228): одну — пусковую, имеющую большое активное сопротивление и малое индуктивное сопротивление, и другую — рабочую, обладающую, наоборот, малым активным сопротивлением и большим индуктивным сопротивлением.

Стержни пусковой клетки изготовляют обычно из марганцовистой латуни. Материалом рабочей клетки служит красная медь. Сечение рабочей клетки делается больше сечения пусковой клетки. В результате подбора материала и сечения клеток сопротивление пусковой клетки получается в четыре-пять раз больше сопротивления рабочей клетки.

Как видно из фиг. 228, *б*, между стержнями пусковой и рабочей обмоток имеется узкая щель, размеры которой определяют индуктивность нижней рабочей клетки.

Рассмотрим работу двухклеточного двигателя.

В момент пуска двигателя, когда частота токов ротора равна частоте сети, магнитный поток рассеяния рабочей клетки велик и поэтому индуктивность клетки также велика. Благодаря этому



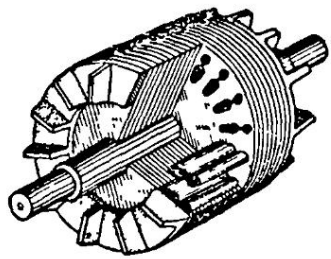
Фиг. 229. Кривые моментов двухклеточного двигателя

сдвиг фаз между током рабочей клетки и э. д. с., индуктированной в ней, будет большим, а момент вращения, создаваемый клеткой, — малым. В результате большого активного сопротивления и малой индуктивности верхней пусковой клетки ток и э. д. с., индуктированные в ней, будут незначительно сдвинуты по фазе и вращающий момент, развиваемый пусковой клеткой, будет большим. Следовательно, при пуске вращающий момент двигателя получается преимущественно за счет пусковой клетки.

С увеличением скорости двигателя частота токов ротора уменьшается, индуктивное сопротивление клеток оказывает на работу двигателя все меньшее влияние и поэтому распределение токов в клетках определяется только их активным сопротивлением. Но как было указано выше, активное сопротивление рабочей клетки в несколько раз меньше сопротивления пусковой клетки. Поэтому при нормальной работе двигателя большая часть тока проходит по рабочей клетке и вращающий момент получается преимущественно за счет рабочей клетки.

На фиг. 229 показана зависимость вращающего момента

двухклеточного двигателя от величины скольжения. На диаграмме кривая *1* показывает изменение момента, создаваемого пусковой обмоткой, кривая *2* — изменение момента, создаваемого рабочей обмоткой. Сумма мгновенных значений моментов двух обмоток дает кривую *M* момента двухклеточного двигателя.

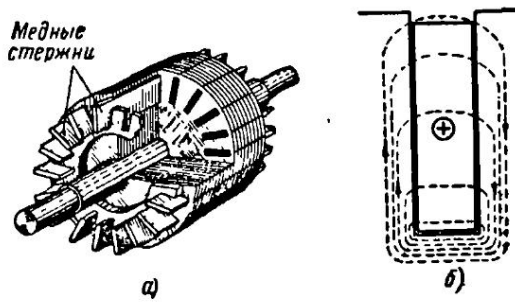


Фиг. 230. Ротор с двойной алюминиевой клеткой

Более простым в изготовлении является ротор, у которого обе клетки залнвают алюминием. На фиг. 230 показаи внешний вид и частичный разрез ротора с двойной литой алюминиевой клеткой.

Двухклеточный двигатель дороже асиихронного двигателя с короткозамкнутым ротором обычной конструкции на 20—30%. Наши заводы изготовляют двухклеточные двигатели от 5 до 2000 *квт*.

Наряду с двухклеточным двигателем применяются двигатели с глубоким пазом (фиг. 231). Отношеиие длины паза к ширине берется в пределах 10—12. В момент пуска иижняя часть паза сцеплена с бо́льшим числом магнитных линий потока рассеяиия, чем верхняя часть паза. Вследствие этого индуктивное сопро-



Фиг. 231. Ротор с глубоким пазом:
а — общий вид с частичным разрезом, *б* — разрез паза

тивление нижней части паза больше, чем верхней. Это приводит к вытеснеиию тока ротора в верхнюю часть стержней обмотки. Плотность тока в верхних слоях стержия увеличивается, что равносильио уменьшению сечения стержней и увеличению активиого сопротивления обмотки. Это, как известно, приводит к увеличению вращающего момента двигателя. Кроме того, увеличение индуктнвиого сопротивления обмотки ротора вызывает умеиьшеиие пускового тока. С увеличением скорости двигатель приобретает свойства, соответствующие его нормальной конструкции.

В табл. 17 приведены пусковые характеристики двигателя с короткозамкнутым ротором нормального исполнения, двухклеточного двигателя и двигателя с глубоким пазом. Пусковые свойства даются в виде отношения пускового тока $I_п$ к номинальному току $I_н$ и в виде отношения пускового момента $M_п$ к номинальному моменту $M_н$.

Таблица 17

Пусковые характеристики двигателей с короткозамкнутым ротором

Двигатель нормального исполнения		Двухклеточный двигатель		Двигатель с глубоким пазом	
$\frac{I_п}{I_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{I_п}{I_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$	$\frac{I_п}{I_н}$	$\frac{M_п}{M_н}$
4—7	0,8—1,2	3,3—5,5	1—2	4—4,8	1,2—1,5

§ 121. Асинхронный двигатель с фазным ротором

Анализируя недостатки асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, следует отметить трудность регулировки скорости вращения этих двигателей и большой пусковой ток у них. Вот основные причины, которые привели к тому, что наряду с асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором применяются еще асинхронные двигатели с фазным ротором.

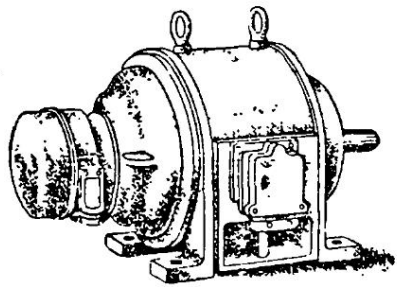
На фиг. 232 представлен внешний вид и разрез асинхронного двигателя с фазным ротором, а на фиг. 233 этот двигатель показан в разобранном виде.

Устройство статора такого двигателя и обмотка его не отличаются от устройства статора двигателя с короткозамкнутым ротором. Различие между двумя этими двигателями заключается в устройстве ротора. Электродвигатель с фазным ротором имеет ротор, на котором, как и на статоре, помещены три фазные обмотки, соединенные между собой звездой (реже треугольником). Концы фазных обмоток ротора присоединяют к трем медным кольцам, укрепленным на валу ротора и изолированным как между собой, так и от стального сердечника ротора, вследствие чего этот двигатель получил также название двигателя с контактными кольцами.

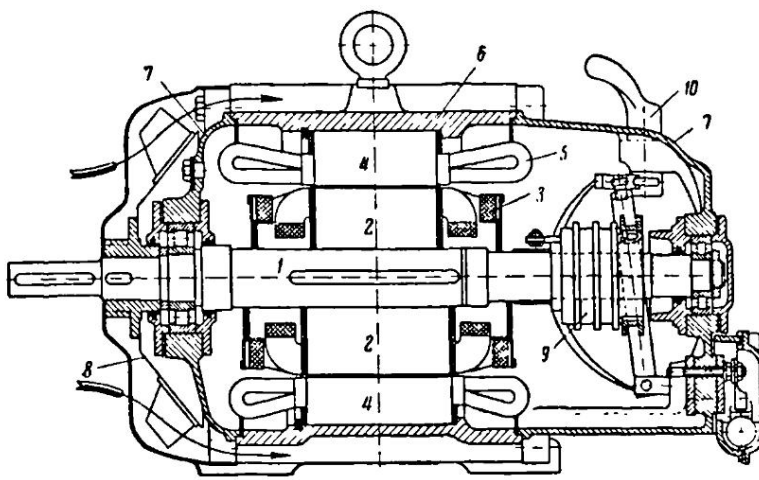
Выше мы указывали на то, что введение активного сопротивления в цепь ротора при пуске уменьшает пусковой ток двигателя и увеличивает пусковой вращающий момент. Для этой цели двигатели с фазным ротором имеют пусковой реостат (фиг. 234), соединенный с обмоткой ротора при помощи щеток, наложенных на контактные кольца. При пуске двигателя вводится полное сопротивление реостата (это положение показано на фиг. 234). По мере увеличения скорости вращения ротора сопротивление

реостата постепенно выводится и, когда, наконец, двигатель достигнет своей нормальной скорости, сопротивление реостата полностью выводится; реостат замыкается накоротко.

В некоторых конструкциях двигателей с фазным ротором имеется приспособление, позволяющее замыкать контактные кольца и поднимать щетки.



а)



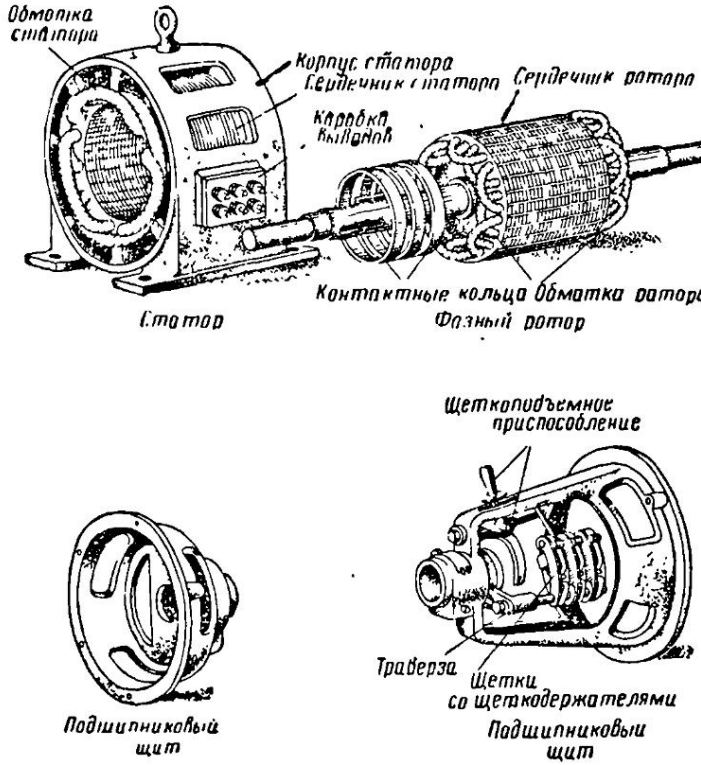
б)

Фиг. 232. Асинхронный двигатель с фазным ротором:

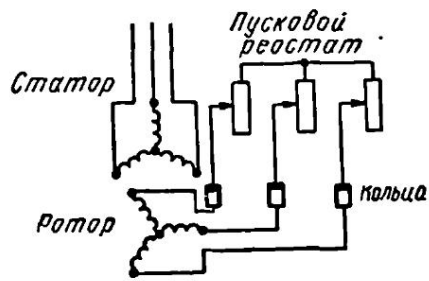
а — внешний вид; *б* — продольный разрез двигателя, верхняя половина соответствует исполнению на $n = 1500$ *об/мин*, нижняя на $n_1 = 1000$ *об/мин*: *1* — вал, *2* — сталь ротора, *3* — обмотка ротора, *4* — сталь статора, *5* — обмотка статора, *6* — корпус статора, *7* — подшипниковые щиты, *8* — вентилятор, *9* — контактные кольца, *10* — ручка для подъема щеток

§ 122. Свойства асинхронных двигателей и области их применения

Преимущества асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором: 1) приблизительно постоянная скорость при разных нагрузках; 2) возможность большой перегрузки; 3) простота конструкции; 4) простота пуска и возможность его автоматизации; 5) более высокие $\cos\varphi$ и к. п. д., чем у двигателей с фазным ротором.



Фиг. 233. Асинхронный двигатель с фазным ротором в разобранном виде



Фиг. 234. Схема включения асинхронного двигателя с фазным ротором и пусковым реостатом

Их недостатки: 1) затруднения в регулировании числа оборотов; 2) большой пусковой ток; 3) низкий $\cos\varphi$ при недогрузках; 4) чувствительность к колебаниям напряжения.

Практически асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором применяются во всех тех случаях, когда не требуется регулирования скорости вращения двигателя и когда мощности двигателей невелики.

Преимущества асинхронных электродвигателей с фазным ротором: 1) большой начальный вращающий момент; 2) возможность большой перегрузки; 3) приблизительно постоянная скорость при различных нагрузках; 4) меньший пусковой ток по сравнению с двигателями с короткозамкнутым ротором; 5) возможность применения автоматических пусковых приспособлений.

Недостатки этих двигателей: 1) чувствительность к колебаниям напряжения; 2) меньшие $\cos\varphi$ и к. п. д., чем у двигателей с короткозамкнутым ротором; 3) низкий $\cos\varphi$ при недогрузках.

Практически асинхронные электродвигатели с фазным ротором применяются во всех тех случаях, когда не требуется плавной и широкой регулировки скорости и мощности двигателей велики.

Перегрузочная способность электродвигателей характеризуется отношением максимального момента двигателя $M_{макс}$ к его номинальному моменту $M_н$. В зависимости от величины мощности и назначения двигателя отношение $\frac{M_{макс}}{M_н}$ колеблется в пределах 1—3,4.

§ 123. Устройство обмоток статора и ротора асинхронных двигателей

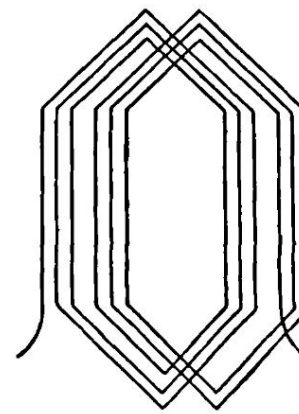
Для того чтобы получить вращающееся магнитное поле, на статоре двигателя располагают трехфазную обмотку. Обмотка помещается в пазы и состоит из ряда катушек, соединенных между собой. Каждая катушка сделана из одного или нескольких витков проводника, изолированных между собой и от стенок паза. Изоляция обмоток зависит от величины напряжения, температуры, на которую рассчитывается обмотка, формы и размеров паза, а также от типа обмотки. Если в пазу помещается одна катушечная сторона, то обмотка называется *одиослойной*, если две — *двухслойной*. Катушка может быть сделана из нескольких секций, состоящих в свою очередь из одного или нескольких витков. На фиг. 235 показана катушка, изготовленная из двух секций, при этом каждая секция состоит из трех витков. Если через z обозначить общее число пазов статора, через $2p$ — число полюсов, то число пазов, приходящихся на одно полюсное деление, будет:

$$Q = \frac{z}{2p}.$$

Полюсным делением τ называется расстояние по окружности статора или ротора между осями двух соседних полюсов. На расстоянии полюсного деления должны находиться пазы всех трех фаз. Следовательно, число пазов, приходящихся на полюс и фазу трехфазной обмотки, будет:

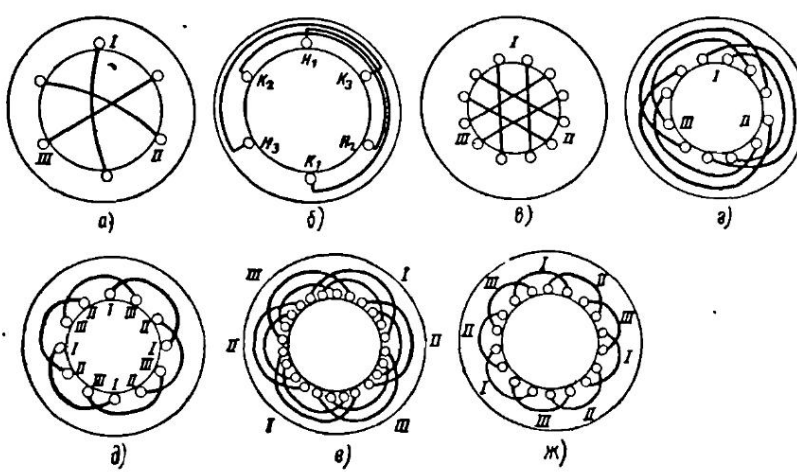
$$q = \frac{Q}{3} = \frac{z}{3 \cdot 2p}.$$

Шагом обмотки y называется расстояние между началом и концом катушки (или секция обмотки). Шаг обмотки выражается в долях полюсного деления τ или числом пазов. В двухслойных обмотках ширина секции берется обычно меньше τ (укороченный шаг), что позволяет лучше использовать медь обмотки.



Фиг. 235. Катушка обмотки из двух секций

На фиг. 236, *а* показана обмотка статора асинхронного двигателя. У этой обмотки каждая катушка состоит из двух проводников. Однако при намотке большого числа витков проводники закроют статор изнутри и ротор нельзя будет поставить на место. Отгибая проводники по сторонам, получим обмотку, показанную на фиг. 236, *б*. Обмотка, состоящая из трех катушек, создает магнитное поле с двумя полюсами. За один период трехфазного тока магнитное поле сде-

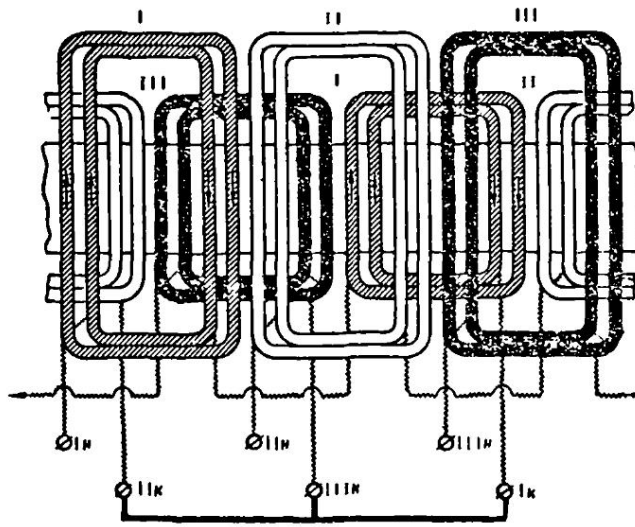


Фиг. 236. Различные виды обмотки статора асинхронного двигателя

лает один оборот. При частоте 50 *гц* это будет соответствовать 50 *об/сек*, или 3000 *об/мин*.

На фиг. 236, *в* и *г* показана обмотка, у которой каждая сторона катушки состоит из двух проводников.

Скорость вращения магнитного поля четырехполюсного статора вдвое меньше скорости вращения поля двухполюсного статора, т. е. 1500 *об/мин* (при 50 *гц*). Обмотка четырехполюсного статора с одним проводником на полюс и фазу показана на фиг. 236, *д*, а с двумя проводниками на полюс и фазу — на фиг. 236, *е*.



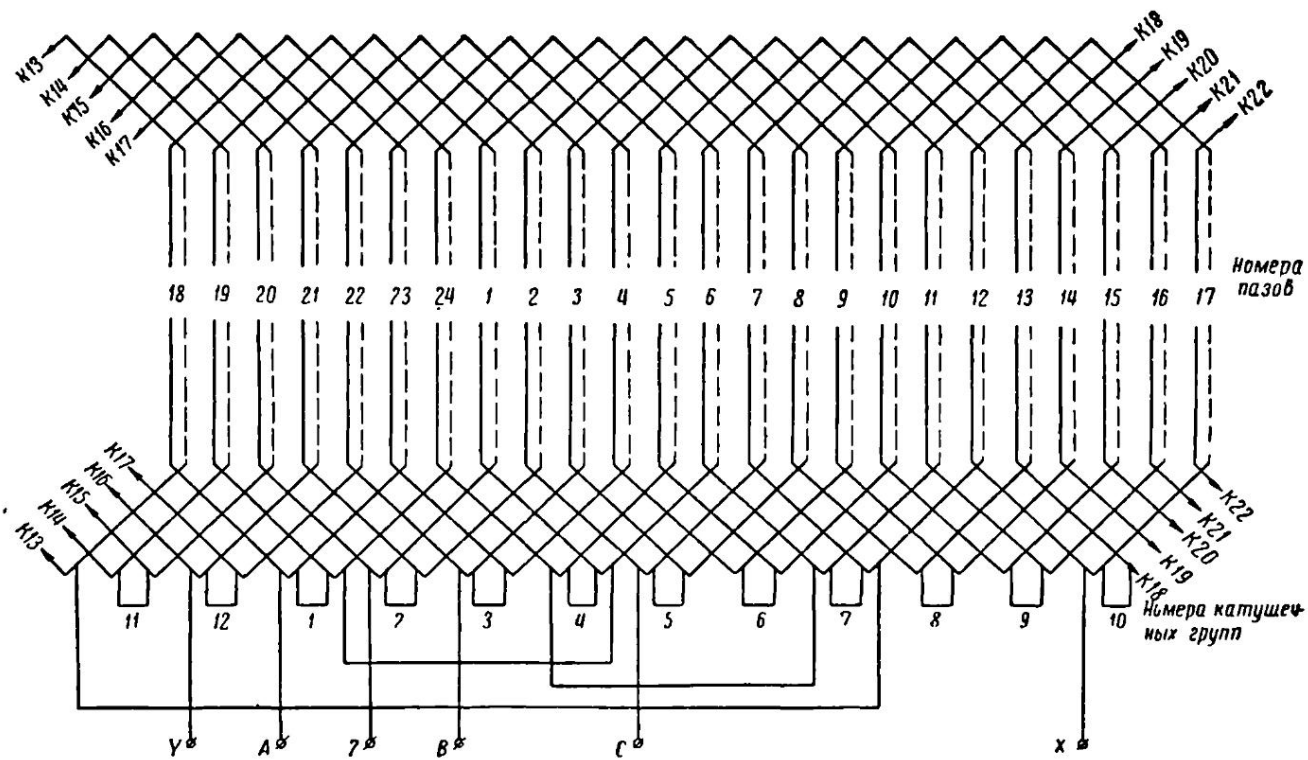
Фиг. 237. Развернутая схема трехфазной однослойной обмотки

Магнитное поле шестиполюсного статора имеет втрое меньшую скорость, чем двухполюсного, т. е. 1000 *об/мин* (при 50 *гц*). Обмотка шестиполюсного статора с одним проводником на полюс и фазу представлена на фиг. 236, *ж*.

Число всех пазов на статоре равно утроенному произведению числа полюсов статора на число пазов, приходящееся на полюс и фазу.

Развернутая схема трехфазной однослойной обмотки показана на фиг. 237, а двухслойной петлевой обмотки с укороченным шагом — на фиг. 238.

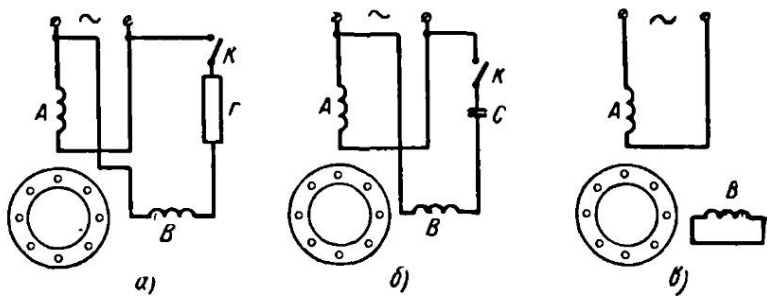
Шесть концов обмотки статора выводятся на щиток зажимов двигателя.



Фиг. 238. Развернутая схема трехфазной двухслойной обмотки с укороченным шагом

§ 124. Однофазные асинхронные двигатели

Однофазные асинхронные двигатели в отличие от трехфазных двигателей имеют на статоре однофазную обмотку (фиг. 239, *а*, *б* и *в*, обмотка *А*). Ротор однофазного двигателя имеет трехфазную обмотку с кольцами или короткозамкнутую обмотку. Выше было указано, что однофазный ток не создает вращающегося магнитного поля. Поэтому однофазные двигатели не имеют начального или пускового вращающегося момента. Для создания пускового момента на статоре двигателя располагают вторую, так называемую пусковую обмотку, сдвинутую относительно рабочей обмотки на угол 90° (фиг. 239, *а* и *б*, об-



Фиг. 239 Схема пуска однофазных асинхронных двигателей:
а — последовательно с пусковой обмоткой включено активное сопротивление, *б* — последовательно с пусковой обмоткой включена емкость, *в* — пусковая обмотка — короткозамкнутые витки, заложенные в пазах статора

мотка *В*). Обе обмотки питаются от сети однофазного тока. Для создания сдвига фаз между токами обеих обмоток на угол, близкий к 90°, последовательно с пусковыми обмотками, включается активное сопротивление или емкость (фиг. 239, *а* и *б*). Пусковая обмотка включается только на время пуска, и после того как двигатель развил нормальную скорость вращения, она посредством рубильника *К* отключается от сети. Двигатель продолжает работать с одной рабочей обмоткой.

У однофазных двигателей малой мощности (0,5—30 *вт*) пусковая обмотка представляет собой короткозамкнутые витки (фиг. 239, *в*). В этом случае на статоре имеются явно выраженные полюсы, часть которых охватывается короткозамкнутыми витками. Токи в такой обмотке индуктируются рабочей обмоткой.

Однофазные асинхронные двигатели по сравнению с трехфазными двигателями имеют следующие недостатки: 1) отсутствие начального пускового момента; 2) малая перегрузочная способность; 3) более низкий к. п. д.; 4) меньший коэффициент мощности ($\cos\varphi$).

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия асинхронного двигателя?
2. Что называется скольжением двигателя и как его определить?
3. Провести аналогию между асинхронным двигателем и трансформатором.
4. От чего зависит вращающий момент асинхроиного двигателя?
5. Как устроеи асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором?
6. Как устроены двухклеточные двигатели и двигатели с глубоким пазом?
7. Как устроены асинхронные двигатели с фазным ротором?
8. Зачем при пуске асинхронных двигателей с фазным ротором в цепь ротора вводится пусковой реостат?
9. Как устроен однофазный асинхронный двигатель и как он включается в сеть?

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Синхронной машиной называется машина, скорость вращения которой постоянна и определяется при заданной частоте переменного тока числом пар полюсов p:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}.$$

По принципу обратимости, открытому Э. Х. Ленцем, синхронная машина может работать как генератором, так и двигателем.

§ 125. Синхронные генераторы

В основе работы синхронных генераторов лежит явление электромагнитной индукции. Так как принципиально безразлично, будет ли движущийся проводник пересекать неподвижное магнитное поле, или, наоборот, подвижное поле будет пересекать неподвижный проводник, то конструктивно синхронные генераторы могут быть изготовлены двух видов. В первом из них магнитные полюсы можно поместить на статоре и питать их обмотку постоянным током, а проводники расположить на роторе и снимать с них при помощи колец и щеток переменный ток.

Часто ту часть машины, которая создает магнитное поле, называют индуктором, а ту часть машины, где располагается обмотка, в которой индуктируется э. д. с., называют якорем.

Следовательно, в первом типе генератора индуктор неподвижен, а якорь вращается.

Современные синхронные генераторы строятся на напряжение до 18 *кв*. Снимать такие высокие напряжения с вращающейся обмотки якоря при помощи скользящих контактов (колец и щеток) становится невозможным, так как обмотку высокого напряжения трудно изолировать. Кроме того, при вращающемся якоре нужны три кольца, а при вращающейся обмотке возбуждения — только два. При больших мощностях якоря габариты трех его колец получились бы весьма значительными. Этим объясняется, что в современных генераторах обмотку якоря

располагают на неподвижной части машины — статоре, а обмотку возбуждения (магнитные полюсы) — на роторе.

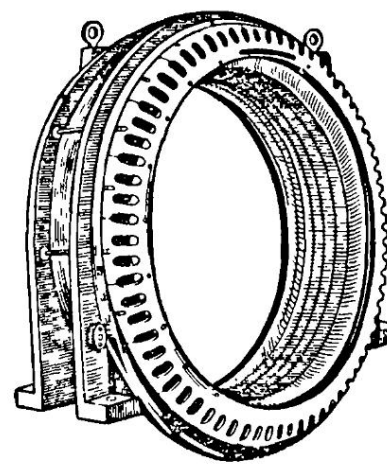
Схема двухполюсного синхронного генератора этого типа была дана нами на фиг. 176. Для вращения ротора синхронного генератора устанавливают первичный двигатель. В качестве первичного двигателя применяются: паровая турбина (генератор вместе с турбиной называется турбоагрегатом), водяная турбина (гидроагрегат), двигатель внутреннего сгорания, чаще дизель (дизель-агрегат), электрический двигатель (двигатель-генератор) и т. п. Названия турбогенератор, гидрогенератор и дизель-генератор относятся к одной машине (обычно к синхронному генератору).

§ 126. Устройство синхронных генераторов

1. Статор. Статор синхронного генератора, как и других машин переменного тока, состоит из сердечника, набранного из листов электротехнической стали, в пазах которого укладывается обмотка переменного тока, и станины — чугунного или сварного из листовой стали кожуха.

В выштампованные на внутренней поверхности сердечника пазы укладывается обмотка статора. Изоляция обмотки выполняется особо тщательно, так как машине приходится работать обычно при высоких напряжениях. В качестве изоляции применяют миканит и миканитовую ленту.

На фиг. 240 дан внешний вид статора синхронного генератора.



Фиг. 240. Внешний вид статора синхронного генератора

2. Ротор. Роторы синхронных машин по конструкции делятся на два типа:

а) явнополюсные (т. е. с явно выраженными полюсами) и

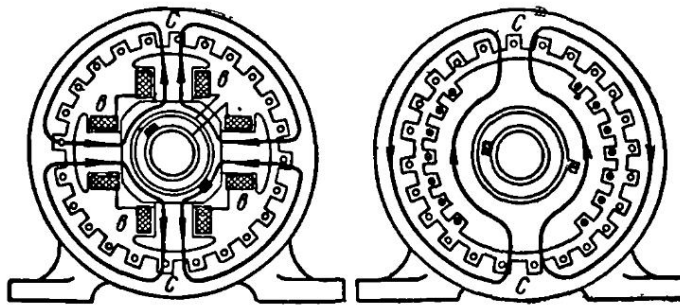
б) неявнополюсные (т. е. с неявно выраженными полюсами).

На фиг. 241 показаны схемы устройства синхронных генераторов с явнополюсным и неявнополюсным роторами.

Та или иная конструкция ротора диктуется соображениями механической прочности. У современных генераторов, вращающихся от быстроходных двигателей (паровая турбина), окружная скорость ротора может достигать 100—160 *м/сек* (в некоторых случаях 170 *м/сек*). Поэтому быстроходные генераторы

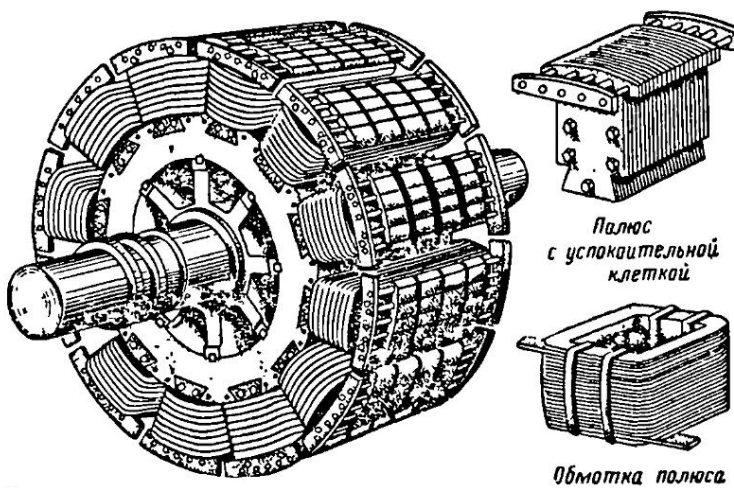
имеют неявнополюсный ротор. Скорость вращения быстроходных генераторов составляет 3000 об/*мин* и 1500 об/*мин*.

Явнополюсный ротор представляет собой стальную поковку.



Фиг. 241. Схема устройства синхронных генераторов с явнополюсным и неявнополюсным роторами

К ободу ротора прикрепляются полюсы, на которые надеваются катушки возбуждения, соединяемые последовательно между собой. Концы обмотки возбуждения присоединяются к двум



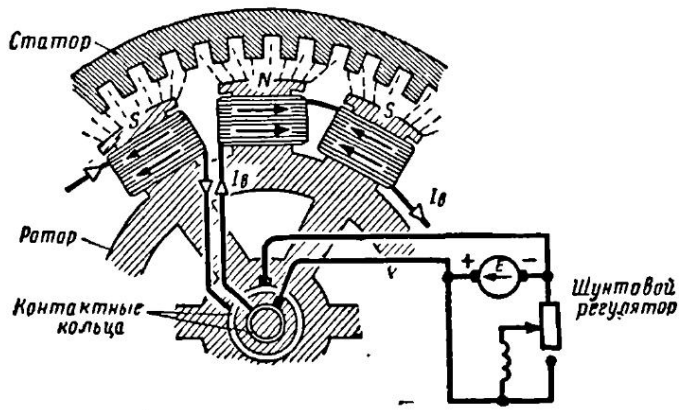
Фиг. 242. Внешний вид явнополюсного ротора

кольцам, укрепленным на валу ротора. На кольца накладываются щетки, к которым присоединяется источник постоянного напряжения. На фиг. 242 показан внешний вид явнополюсного ротора. Обычно постоянный ток для возбуждения ротора дает

генератор постоянного тока, сидящий на одном валу с ротором и называемый возбудителем. Мощность возбудителя равна 0,25—1% от номинальной мощности синхронного генератора. Номинальные напряжения возбудителей 60—350 *в*.

На фиг. 243 показана схема возбуждения синхронной машины.

Имеются также синхронные генераторы с самовозбуждением. Постоянный ток для возбуждения ротора получается с помощью селеновых выпрямителей, подключаемых к обмотке статора генератора. В первый момент слабое поле остаточного магнетизма вращающегося ротора индуктирует в обмотке статора незначительную переменную э. д. с. Селеновые выпрямители, под-



Фиг. 243. Схема возбуждения синхронной машины

ключенные к переменному напряжению, дают постоянный ток, который усиливает поле ротора, и напряжение генератора увеличивается.

Неявнополюсный ротор изготовляется из целой стальной поковки, подвергаемой сложной термической и механической обработке. Для примера приведем данные ротора турбогенератора, изготовленного заводом «Электросила», мощностью 100 тыс. *квт* при $n = 3000$ *об/мин*. Диаметр ротора $D = 0{,}99$ *м*, длина $l = 6{,}35$ *м*. Окружная скорость ротора 155 *м/сек*. Поковка ротора в обработанном виде весит 46,5 *т*.

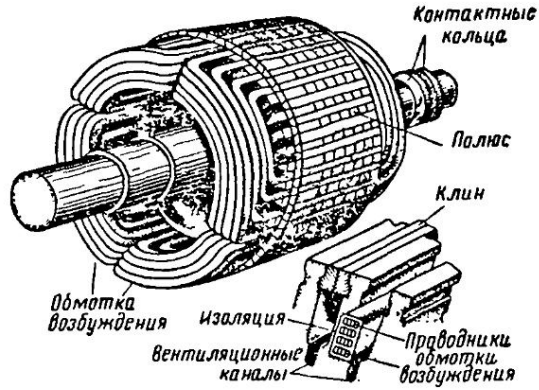
В осевом направлении по окружности ротора фрезеруют пазы, куда укладывается обмотка возбуждения. Обмотка в пазах закрепляется при помощи металлических (стальных или бронзовых) клиньев. Лобовые части обмотки закрепляются бандажными металлическими кольцами.

На фиг. 244 показан общий вид неявнополюсного ротора турбогенератора в готовом виде.

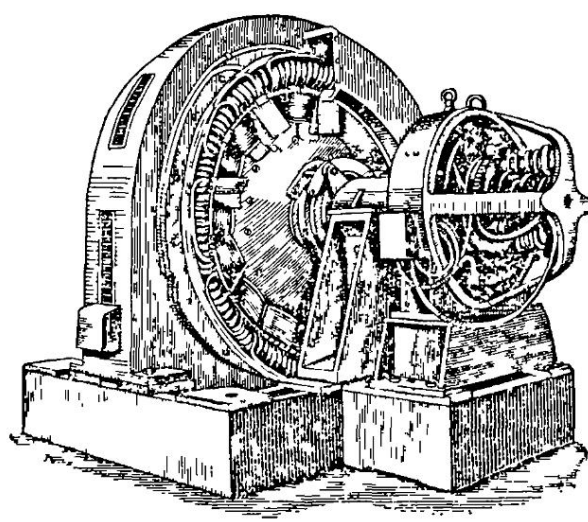
При конструировании электрических машин и трансформаторов большое внимание конструкторы обращают на вентиляцию

машин. Для синхронных генераторов применяется воздушное и водородное охлаждение.

Воздушное охлаждение осуществляется при помощи вентиляторов, укрепленных на валу с обеих сторон ротора (для гене-



Фиг. 244. Общий вид неявнополюсного ротора в сборе

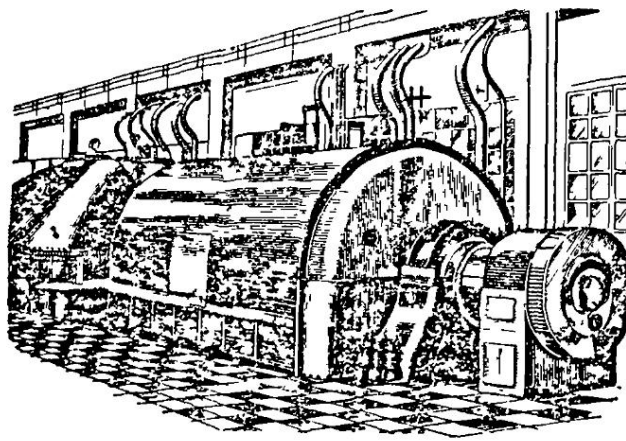


Фиг. 245. Общий вид синхронного генератора с возбудителем

раторов мощностью от 1,5 до 50 тыс. *квт*) или расположенных под машиной в отверстии фундамента (для генераторов мощностью 100 тыс. *квт*).

Массы холодного воздуха, поступающие для вентиляции, во избежание загрязнения машины пылью проходят через фильтры.

При замкнутой системе вентиляции машина охлаждается одним и тем же объемом воздуха. Воздух, пройдя через машину, нагревается и поступает в воздухоохладители, затем снова нагнетается в машину и т. д. Для целей охлаждения служит также система вентиляционных каналов, устроенных в отдельных частях машины. Наиболее эффективным способом охлаждения машины является водородное охлаждение. Водород, обладающий в 7,4 раза большей теплопроводностью, чем воздух, лучше отводит тепло от нагретых частей машины. Потери на трение о воздух при воздушном охлаждении составляют около 50% от



Фиг. 246. Внешний вид синхронного генератора мощностью 50 тыс. *квт*

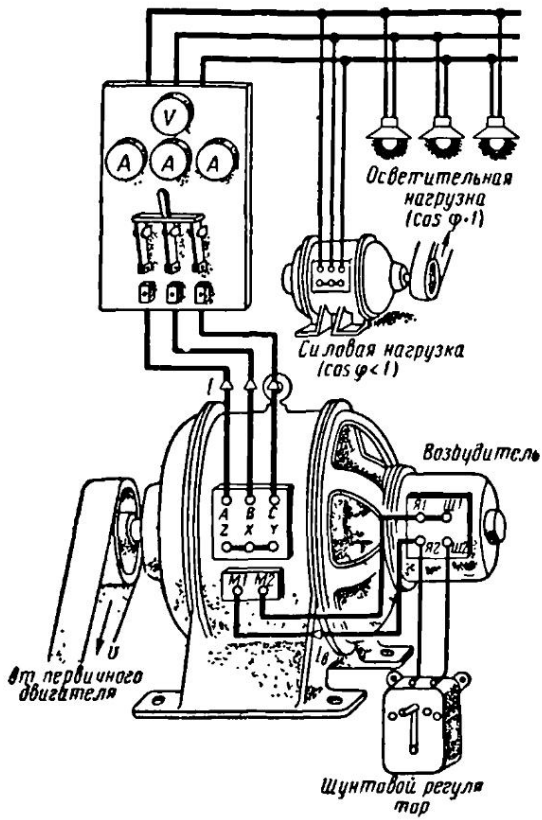
суммы всех потерь в машине. Водород имеет удельный вес в 14,5 раза меньше, чем воздух. Поэтому трение о водород резко уменьшается. Водород способствует также сохранению изоляции и лаковых покрытий машины. Внешний вид явнополюсного синхронного генератора с возбудителем показан на фиг. 245, а неявнополюсного синхронного генератора мощностью 50 тыс. *квт* — на фиг. 246.

Гидрогенераторы приводятся во вращение гидравлическими турбинами. Эти турбины чаще всего имеют вертикальный вал с низким числом оборотов. Тихоходный синхронный генератор имеет большое число полюсов и как следствие этого — большие размеры.

Так, например, гидрогенератор типа СВ $\frac{1200}{170}$ 96 мощностью 50 тыс. *квт*, изготовленный заводом «Электросила» им. С. М. Кирова, имеет общий вес 1142 *т*, диаметр статора 14 *м*, общую высоту 8,9 *м*, число полюсов 96.

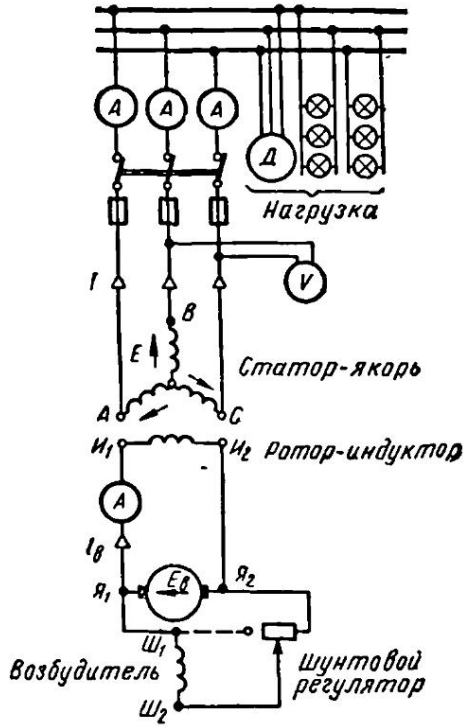
На фиг. 247 показана схема синхронного генератора с возбудителем, питающим силовую и осветительную нагрузку. На фиг. 248 дана электрическая схема соединений синхронного генератора с нагрузкой.

Обмотки статоров синхронных генераторов выполняются так же, как обмотки статоров асинхронных двигателей.

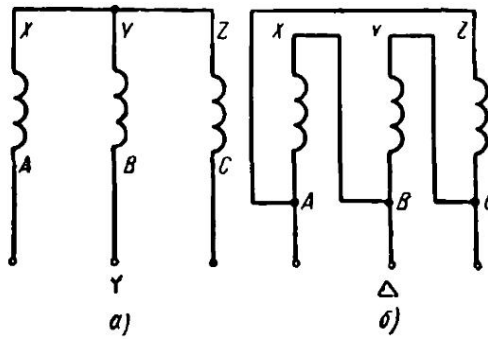


Фиг. 247. Схема синхронного генератора с возбудителем

Все шесть концов трехфазных обмоток генератора обычно выводятся на его щиток. Соединяя три конца обмоток в одну общую нулевую точку и выводя три начала обмоток во внешнюю сеть, мы получим соединение обмоток звездой (фиг. 249, *а*). Соединяя конец первой обмотки с началом второй, конец второй с началом третьей, конец третьей с началом первой обмотки и сделав от точек соединений три отвода во внешнюю сеть, получим соединение обмоток треугольником (фиг. 249, *б*).



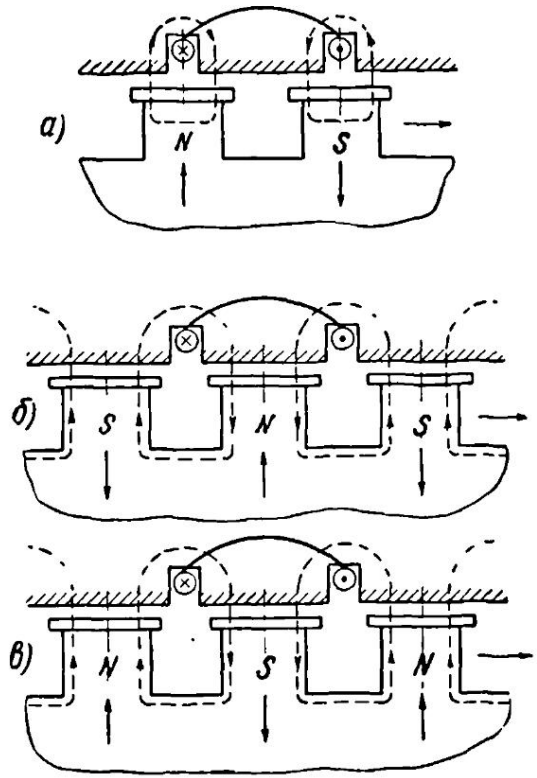
Фиг. 248. Электрическая схема соединений синхронного генератора с нагрузкой



Фиг. 249. Соединение фазных обмоток трехфазного генератора в звезду и в треугольник

§ 127. Реакция якоря синхронного генератора

При нагрузке синхронного генератора по обмотке статора проходит ток, который создает свой магнитный поток. Последний, вступая во взаимодействие с потоком ротора, образует результирующий магнитный поток машины. Такое действие магнитного потока статора (здесь якоря) на поток полюсов ротора



Фиг. 250. Реакция якоря синхронного генератора

называется реакцией якоря. В дальнейшем изложении магнитным потоком рассеяния статора пренебрегаем.

Реакция якоря оказывает на работу синхронного генератора большое влияние. Рассмотрим три характерных случая:

1. Генератор нагружен на активную нагрузку. Ток I совпадает по фазе с э. д. с., индуктированной в обмотке статора.

Разберем момент, когда обе стороны катушки одной фазной обмотки оказались над серединами полюсов (фиг. 250, *а*). В этот момент э. д. с. катушки имеет максимальное значение, а так как нагрузка генератора чисто активная, то и ток в катушке будет

иметь максимальное значение. Направление магнитных линий вокруг проводников катушки статора определяется по правилу буравчика. Из чертежа видно, что поле статора размагничивает набегавший край полюсов и намагничивает сбегающий край полюсов. Этот случай носит название поперечной реакции якоря.

2. Генератор нагружен на чисто индуктивную нагрузку, при этом ток отстает от э. д. с. на 90° (фиг. 250, *б*). Максимум тока наступает в момент, когда полюсы проходят за соответствующие проводники расстояние, равное половине полюсного деления. Из чертежа видно, что магнитный поток статора направлен навстречу потоку полюсов вдоль их оси. Этот случай носит название продольно-размагничивающей реакции якоря.

3. Генератор нагружен на чисто емкостную нагрузку. При этом ток опережает э. д. с. на 90° (фиг. 250, *в*).

Максимум тока наступает в момент, когда полюсы не дойдут до соответствующих проводников на расстояние, равное половине полюсного деления. Из чертежа видно, что магнитный поток статора направлен согласно с потоком полюсов вдоль их оси.

Этот случай носит название продольно-намагничивающей реакции якоря. На фиг. 250 показаны моменты, когда токи в цепи обмотки одной фазы имеют максимальное значение. В любые другие моменты величины токов в обмотке фазы статора будут меньше, и реакция якоря обмотки одной фазы будет соответственно ослаблена. В действительности нагрузка имеет смешанный характер. Поэтому магнитный поток реакции якоря будет иметь как поперечную, так и продольную составляющие.

Таким образом, реакция якоря синхронного генератора зависит от характера нагрузки, т. е. от сдвига фаз между индуктированной в статоре э. д. с. и его током.

§ 128. Характеристики синхронных генераторов

Работа машины в различных режимах и свойства самой машины определяются ее характеристиками.

Для снятия характеристик синхронного генератора собирают схему, представленную на фиг. 251.

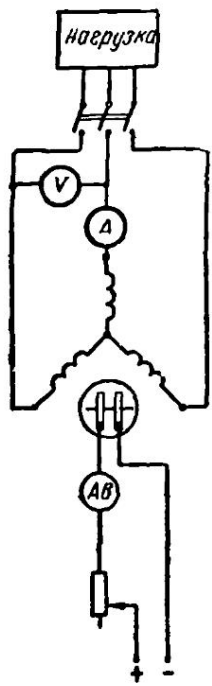
Рассмотрим характеристику холостого хода синхронного генератора. Она представляет зависимость индуктированной в статоре э. д. с. E_0 от тока возбуждения $I_в$ при разомкнутой внешней цепи машины:

$$E_0 = f(I_в) \text{ при } n = n_н \text{ и } I = 0.$$

Генератор приводится во вращение с синхронной скоростью, соответствующей номинальной частоте генератора. Увеличивают при помощи реостата ток возбуждения, отмечая показания амперметра в цепи возбуждения. По показаниям вольтметра,

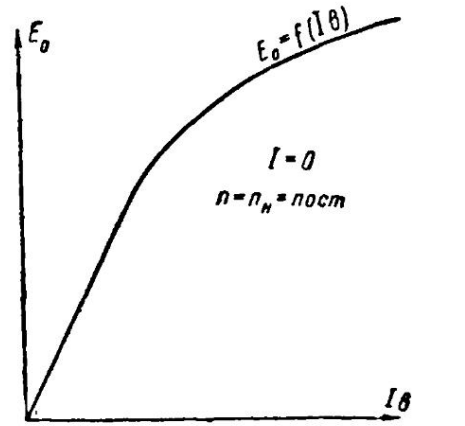
включенного на зажимы обмотки статора, определяют величину индуктированной э. д. с. E_0.

Характеристика холостого хода синхронного генератора показана на фиг. 252. Прямолинейная часть характеристики указывает на пропорциональность между индуктированной э. д. с. и током возбуждения. В дальнейшем магнитная система генератора насыщается, кривая изгибается, т. е. при значительном увеличении тока возбуждения индуктированная э. д. с. растет очень медленно. Обычно нормальная работа машины имеет место за изгибом характеристики холостого хода.



Фиг. 251. Схема снятия характеристик синхронного генератора

Зависимость напряжения на зажимах генератора U от тока нагрузки I при постоянных (*пост*) значениях тока возбуждения $I_в$, коэф-



Фиг. 252. Характеристика холостого хода синхронного генератора

фициента мощности $\cos\varphi$ и скорости вращения n дается внешней характеристикой:

$$U=f(I)$$

при $I_в=пост$, $\cos\varphi=пост$, $n=n_н=пост$.

По показаниям амперметра и вольтметра, включенных в цепь обмотки статора, строят характеристику. На фиг. 253 даны внешние характеристики генератора для различных видов нагрузки.

Напомним, что положительным углом φ принято считать угол φ в цепи, когда ток отстает по фазе от напряжения, и отрицательным, когда ток опережает по фазе напряжение.

Изменение напряжения с нагрузкой происходит вследствие реакции якоря и падения напряжения в обмотке якоря (статора).

При индуктивной нагрузке реактивный ток размагничивает машину и напряжение при увеличении тока нагрузки уменьшается.

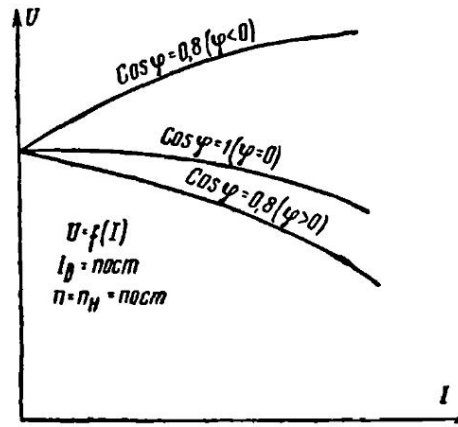
При емкостной нагрузке напряжение генератора с увеличением нагрузки тока повышается вследствие действия продольно-намагничивающей реакции якоря.

Регулировочная характеристика представляет зависимость тока возбуждения $I_в$ от тока нагрузки I при постоянных значениях напряжения на зажимах генератора U, скорости вращения n и коэффициента мощности cos φ:

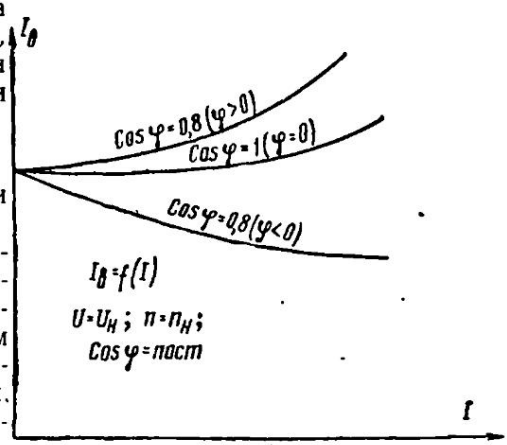
$$I_в = f(I)$$

при $U = U_н$; $n = n_н$ и cos φ = *пост*.

Регулировочные характеристики, представленные на фиг. 254, показывают, как с изменением нагрузки необходимо менять ток возбуждения, чтобы компенсировать падение напряжения в обмотке якоря и действие реакции якоря.



Фиг. 253. Внешние характеристики синхронного генератора



Фиг. 254. Регулировочные характеристики синхронного генератора

§ 129. Параллельная работа синхронных генераторов

Для включения синхронного генератора на параллельную работу необходимо выполнить следующие условия:

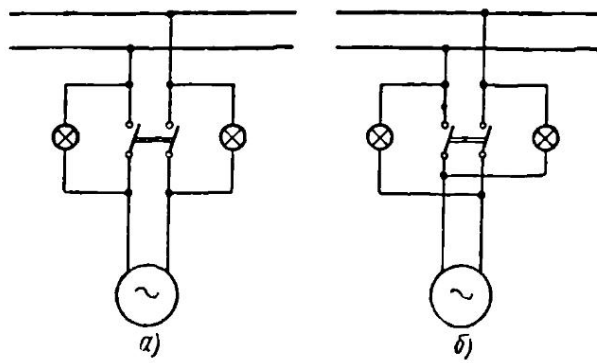
1. Напряжение подключаемой машины должно быть равно напряжению сети или работающей машины.

2. Частота подключаемого генератора должна быть равна частоте сети.

3. Напряжения всех фаз подключаемой машины должны быть противоположны по фазе напряжениям соответствующих фаз сети или работающей машины.

4. Для подключения на параллельную работу трехфазного синхронного генератора необходимо также обеспечить одинаковое чередование фаз подключаемой машины и сети.

Подготовку к включению на параллельную работу синхронного генератора ведут следующим образом. Приводят во вращение первичный двигатель и регулируют его скорость вращения так, чтобы она была примерно равна номинальной. Затем возбуждают генератор и, следя за показаниями вольтметра, под-



Фиг. 255. Включение фазных ламп:
а — на потухание, *б* — на горение

ключенного к зажимам статора, регулируют напряжение машины при помощи реостата в цепи возбуждения до тех пор, пока оно не станет равным напряжению сети. Воздействуя на регулятор первичного двигателя и наблюдая за показаниями частотомера, устанавливают более точно скорость машины так, чтобы частота генератора была равна частоте сети. Тем самым первое и второе условия для включения на параллельную работу будут выполнены.

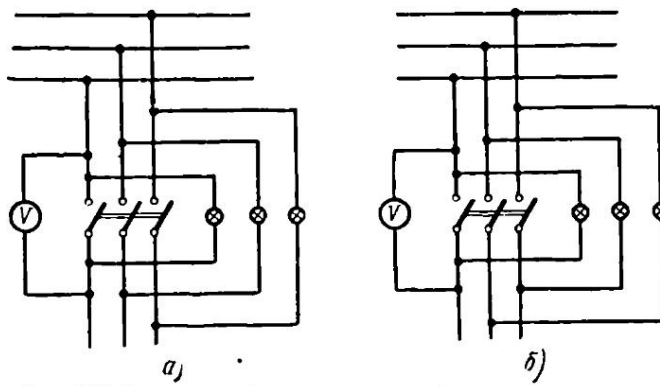
Для выполнения третьего условия, а также для установления полного равенства частот служат фазные лампы. Фазные лампы для машин однофазного тока включаются по двум схемам: на потухание (фиг. 255, *а*) и на горение (фиг. 255, *б*). При совпадении фаз сети и машины лампы, включенные по схеме *а*, погаснут, а по схеме *б* будут гореть полным накалом. В этот момент и нужно включить рубильник генератора.

Для машин трехфазного тока фазные лампы включаются также по двум схемам: на потухание (фиг. 256, *а*) и на вращение света (фиг. 256, *б*). Лампы, включенные по схеме *а*, при одинаковом чередовании фаз сети и машины будут сначала быстро и одновременно мигать, затем мигание их становится

все реже и реже и, когда лампы медленно погаснут, нужно включить рубильник генератора.

Для более точного определения момента включения рубильника часто ставят так называемый нулевой вольтметр, имеющий двустороннюю шкалу.

При одинаковом чередовании фаз сети и машины лампы, включенные по схеме *б*, будут мигать поочередно, и если их расположить по кругу, то получится впечатление вращающегося света. Скорость вращения света зависит от разности частот. Генератор нужно включить в момент, когда лампы, включенные накрест, загорятся полным накалом, а третья лампа погаснет. Иначе говоря, рубильник удобнее включить в момент, когда меняется направление вращения света.



Фиг. 256. Включение фазных ламп трехфазного генератора:
а — на потухание, *б* — на вращение света

При неодинаковом порядке чередования фаз лампы, включенные по схеме *а*, дадут вращение света, а по схеме *б* будут одновременно загораться и потухать. Для изменения порядка чередования фаз машины два любых ее провода, подходящие к рубильнику, нужно поменять местами.

Включение фазных ламп высоковольтных генераторов осуществляется через измерительные трансформаторы напряжения (гл. четырнадцатая, § 171).

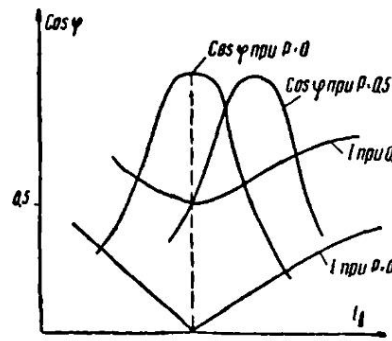
Таким образом, с помощью фазных ламп мы можем определить противоположность фаз, установить равенство частот и порядок чередования фаз сети и подключаемой машины. Чередование фаз машины можно также определить, пользуясь особым прибором — фазоуказателем, представляющим собой небольшой асинхронный двигатель.

Направление вращения диска фазоуказателя показывает порядок чередования фаз.

Когда синхронный генератор работает параллельно с сетью, скорость вращения его остается постоянной, равной синхронной.

Процесс подготовки генератора для включения его на параллельную работу называется синхронизацией.

В последние годы получил распространение метод включения синхронных генераторов на параллельную работу, называемый самосинхронизацией. Сущность этого метода заключается в следующем. Первичным двигателем разворачивают генератор и устанавливают приблизительно синхронную скорость. Замыкают обмотку возбуждения на дополнительное сопротивление, равное 3—5-кратному значению ее сопротивления. Включают рубильник, соединяющий генератор с сетью. Переключают обмотку возбуждения с дополнительного сопротивления к питающему ее источнику постоянного напряжения. После этого генератор сам входит в синхронизм.



Фиг. 257. U-образная характеристика синхронного генератора

Проделаем следующий опыт. В цепь статора синхронного генератора включим амперметр, ваттметр и фазометр. В цепь возбуждения генератора включим амперметр. Включим генератор на параллельную работу и дадим ему некоторую активную нагрузку. Увеличивая ток возбуждения при помощи реостата в цепи возбуждения, будем наблюдать показания приборов. Оказывается, что активная мощность, отдаваемая генератором в сеть, остается практически постоянной и во время опыта ваттметр будет давать неизменные показания. При неизменной активной нагрузке ток в цепи статора при некотором значении тока возбуждения получается минимальным. Это соответствует чисто активному току нагрузки генератора ($\cos\varphi=1$). Если к генератору подключить различные активные нагрузки, то каждому значению активной нагрузки будет соответствовать определенный ток возбуждения, при котором $\cos\varphi=1$. При увеличении тока возбуждения сверх этого значения возникает отстающий реактивный ток. Фазометр будет показывать уменьшение $\cos\varphi$ и генератор будет отдавать в сеть отстающую реактивную мощность. Наоборот, если уменьшать ток возбуждения и сделать его меньшим указанного значения, то появится опережающий реактивный ток. Фазометр снова покажет уменьшение $\cos\varphi$, и генератор будет для создания своего вращающегося поля потреблять из сети отстающую реактивную мощность.

Зависимость тока статора (якоря) синхронного генератора от тока возбуждения при постоянной активной мощности называется U-образной характеристикой машины, по-

лучивший свое название за внешний вид кривой, напоминающей букву U. На фиг. 257 показана U-образная характеристика синхронного генератора.

§ 130. Устройство и работа синхронного двигателя

Синхронный генератор можно заставить работать в качестве электрического двигателя. Такой двигатель будет называться синхронным. Наибольшее распространение получили трехфазные синхронные двигатели. У них обмотка статора питается трехфазным переменным током, а обмотка ротора подключается к источнику постоянного напряжения.

При питании трехфазным переменным током обмотки статора синхронного двигателя возникает вращающееся магнитное поле. Скорость вращения поля зависит от частоты переменного тока и числа полюсов статора. При частоте 50 *гц* и при двух полюсах поле будет делать 3000 *об/мин*, при четырех полюсах — 1500, при шести полюсах — 1000 *об/мин* и т. д.

Однако если после включения статора включить постоянный ток в обмотку ротора, то ротор будет стоять на месте. Самостоятельно он тронуться не может. Это объясняется тем, что магнитное поле статора, вращаясь с большой скоростью относительно неподвижного ротора, не может мгновенно сообщить ротору синхронную скорость и заставить его вращаться. Так как ротор обладает значительной массой и большой инерцией, он не в состоянии тронуться с места и развить необходимую скорость. Поэтому для пуска синхронного двигателя приходится применять специальные устройства.

Синхронный двигатель имеет ценное качество, заключающееся в следующем. Если при малых токах возбуждения ротора он потребляет реактивный ток из сети и работает, как говорят, с отстающим $\cos\varphi$, то, увеличивая ток возбуждения ротора, можно добиться того, что обмотка статора совсем не будет потреблять реактивный ток и $\cos\varphi$ в этом случае будет равен единице.

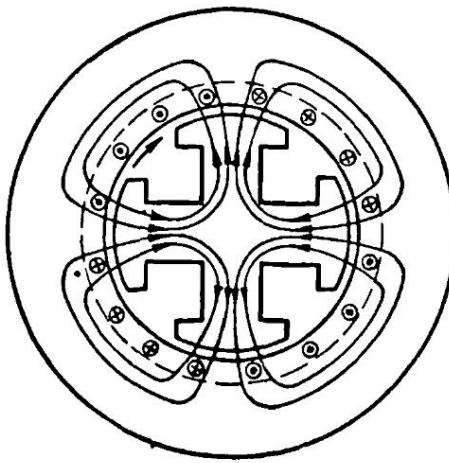
При дальнейшем увеличении тока возбуждения ротора статор сам начнет отдавать в сеть реактивный ток, и синхронный двигатель, продолжая нести механическую нагрузку, превращается одновременно в генератор реактивного тока или реактивной мощности. В этом случае двигатель будет как бы подобен конденсатору и станет работать с опережающим $\cos\varphi$.

Для работы индукционных потребителей переменного тока (асинхронные двигатели, трансформаторы) необходима реактивная мощность. Эту реактивную мощность (или реактивный ток) потребители обычно берут по проводам от электростанции. Если же рядом с такими потребителями работает перевозбужденный синхронный двигатель, то реактивную мощность можно получать от этого двигателя и не брать ее с электростанции. Это приве-

дет к улучшению cos φ установки и к уменьшению тока в проводах, идущих от электростанции.

Синхронный двигатель, предназначенный для улучшения cos φ установки, называется синхронным компенсатором.

В некоторых физических приборах, звуковом кино, радиолах, телемеханических установках и других устройствах, там, где требуется постоянная скорость вращения, нашли себе применение маломощные (порядка нескольких десятков или сотен ватт) реактивные синхронные двигатели (фиг. 258).



Фиг. 258. Схема реактивного синхронного двигателя

На статоре этих двигателей располагается обмотка, питаемая переменным (однофазным или трехфазным) током. Ротор реактивных двигателей явнополюсный, но в отличие от обычных синхронных двигателей не имеет обмотки возбуждения. Магнитные линии вращающегося магнитного поля статора стремятся пройти по пути с меньшим магнитным сопротивлением. Поэтому ротор будет поворачиваться так, чтобы оси его полюсов совпадали с направлением магнитных линий поля статора. Следовательно, ротор будет вращаться синхронно с полем статора.

В качестве метода пуска в ход реактивных двигателей применяется их асинхронный пуск. Реактивные двигатели очень малой мощности нужно разворачивать просто от руки.

По сравнению с другими двигателями переменного тока реактивные двигатели имеют низкие cos φ и к. п. д.

§ 131. Свойства синхронных электродвигателей и области их применения

Преимущества синхронных электродвигателей: 1) сохранение постоянства числа оборотов при различных нагрузках; 2) высокий cos φ; 3) возможность компенсации cos φ. Малая зависимость электромагнитной мощности (и электромагнитного момента) от напряжения (они зависят от первой степени напряжения, в то время как, например, у асинхронных двигателей они зависят от квадрата напряжения).

Недостатки синхронных электродвигателей: 1) ограничен-

ность в выборе скорости вращения и невозможность регулировки ее; 2) выпадение из синхроинзма при перегрузке; 3) склонность к качаниям (заметим, что этого недостатка нет у асинхронных двигателей).

Ввиду указанных особенностей синхронные электродвигатели нашли себе наибольшее применение в непрерывно действующих установках и для привода машин постоянной скорости (поршневые насосы, центробежные насосы, центробежные вентиляторы, компрессоры, двигатель-генераторы, трансмиссионные валы и т. п.).

Контрольные вопросы

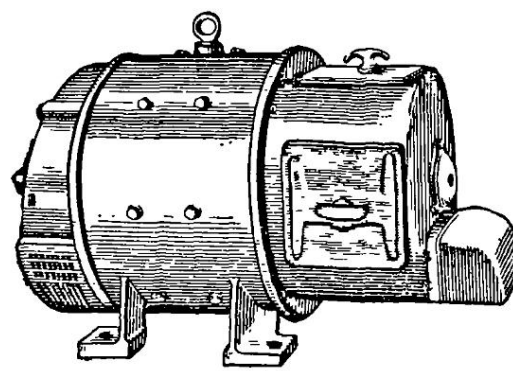
1. Какие существуют типы генераторов переменного тока и как они устроены?
2. Как можно изменять напряжение генератора переменного тока?
3. Как проявляет себя реакция якоря в синхронных генераторах?
4. Как включить синхронный генератор на параллельную работу?
5. Как устроен и работает синхронный двигатель?
6. Каковы преимущества и недостатки синхронных двигателей и области их применения в технике?

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 132. Устройство генератора постоянного тока

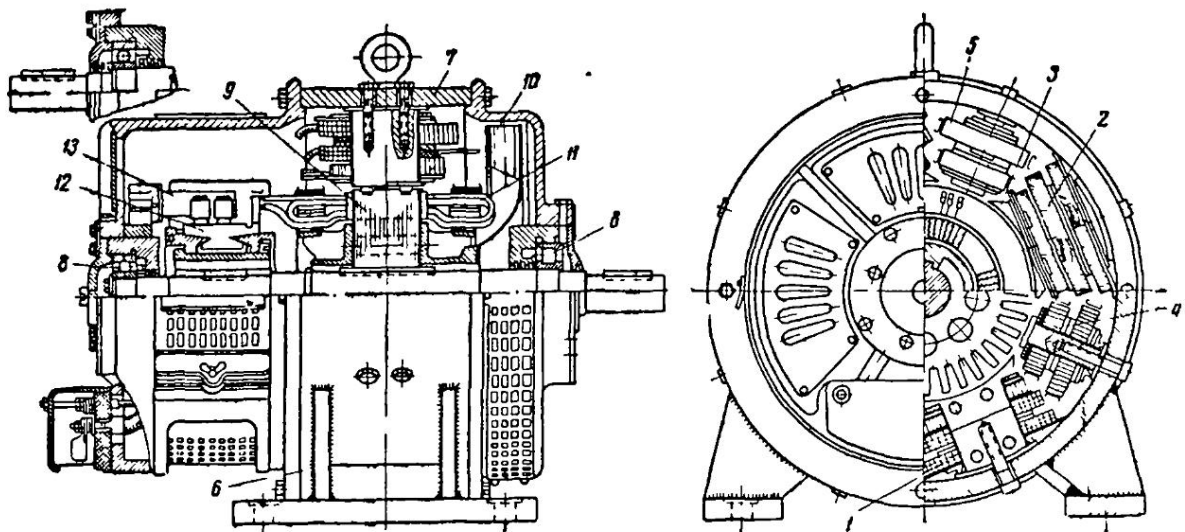
Генератор постоянного тока представляет собой электрическую машину, преобразующую механическую энергию вращающего ее первичного двигателя в электрическую энергию постоянного тока, которую машина отдает потребителям. На фиг. 259 показан внешний вид генератора постоянного тока. На фиг. 260 дан продольный и поперечный разрезы машины постоянного то-



Фиг. 259. Внешний вид генератора постоянного тока

ка. Генератор постоянного тока работает на принципе электромагнитной индукции. Поэтому основными частями генератора являются якорь с расположенной на нем обмоткой и электромагниты, создающие магнитное поле.

Якорь имеет форму цилиндра и набирается из отдельных штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 *мм*. Листы изолированы друг от друга слоем лака или тонкой бумаги. Впадины, выштампованные по окружности каждого листа, при сборке якоря и сжатии листов образуют пазы, куда укладываются изолированные проводники обмотки якоря.

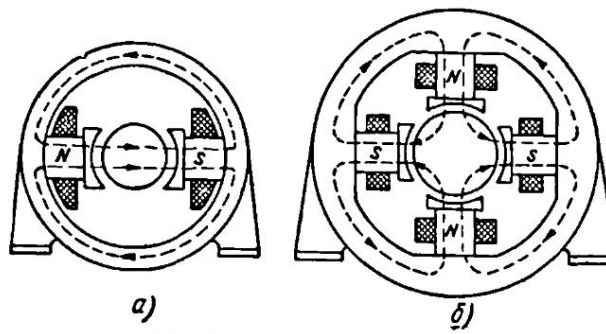


Фиг. 260. Продольный и поперечный разрезы машины постоянного тока:

1 — сердечник основного полюса, *2* — катушка основного полюса, *3* — полюсный наконечник, *4* — сердечник добавочного полюса, *5* — катушка добавочного полюса, *6* — станина, *7* — ярмо, *8* — щитовой подшипник, *9* — сердечник якоря, *10* — вентилятор, *11* — обмотка якоря, *12* — коллектор, *13* — щеточный палец

На валу якоря укрепляется коллектор, состоящий из отдельных медных пластин, припаянных к определенным местам обмотки якоря. Пластины коллектора изолированы друг от друга миканитом. Коллектор служит для выпрямления тока и отвода его при помощи неподвижных щеток во внешнюю сеть (см. дальше).

Электромагниты генератора постоянного тока состоят из стальных полюсных сердечников, привернутых болтами к станине. Станина генератора отливается из стали. У машин очень малой мощности станина отливается вместе с полюсными сер-



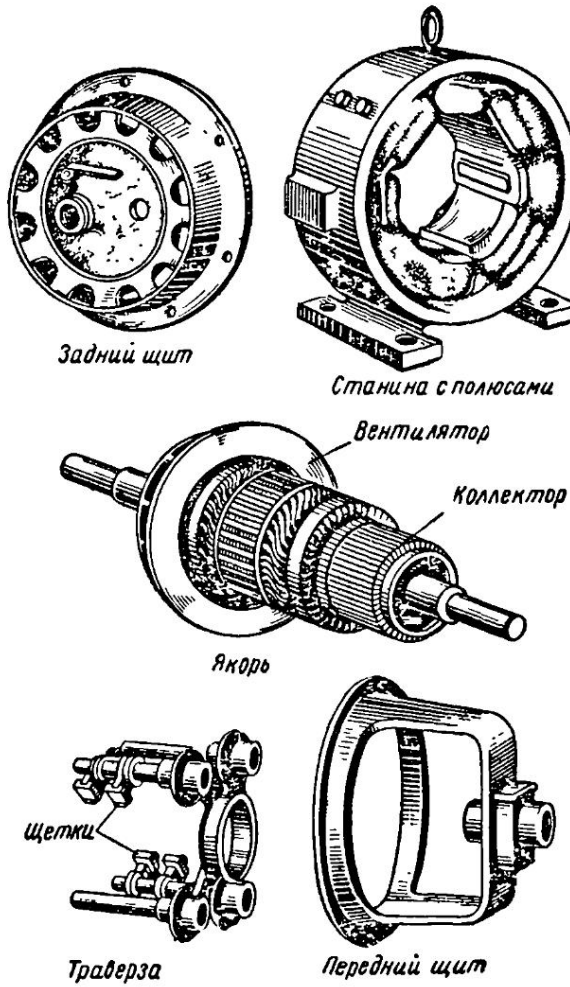
Фиг. 261. Станины машин постоянного тока:
а — с двумя полюсами, *б* — с четырьмя полюсами

дечниками. В остальных случаях сердечники полюсов набираются из отдельных листов электротехнической стали. На сердечники надеваются катушки, изготовленные из медной изолированной проволоки. Пропущенный через обмотку возбуждения (электромагнитов) постоянный ток создает магнитный поток полюсов. Для лучшего распределения магнитного потока в воздушном зазоре к ярму прикрепляют полюсы с наконечниками, собранные из отдельных стальных листов. В подавляющем большинстве случаев полюс штампуется вместе с полюсным наконечником. На фиг. 261 показано схематическое устройство станины с двумя и четырьмя полюсами.

Машина постоянного тока в разобранном виде показана на фиг. 262.

Внешняя цепь соединяется с цепью якоря машины постоянного тока при помощи щеток, укрепленных в щеткодержателях, которые располагаются на щеточных болтах траверсы. Болты изолируются от траверсы при помощи изолирующих втулок и шайб. На фиг. 263 показаны траверса и щеткодержатели со щетками.

При вращении якоря обмотка его пересекает магнитные линии полюсов. По закону электромагнитной индукции в провод-



Фиг. 262. Машина постоянного тока в разобранном виде

никах обмотки якоря будет индуктироваться электродвижущая сила, величина которой может быть подсчитана по формуле

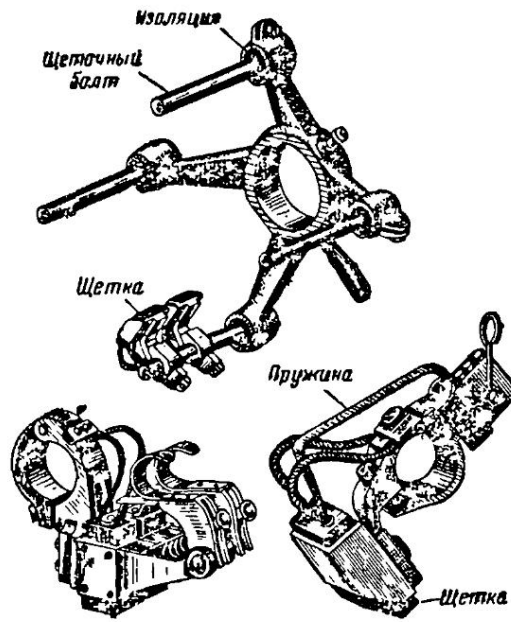
$$e = Blv \sin \alpha,$$

где B — магнитная индукция полюсов (выражена в $\frac{в \cdot сек}{м^2}$);

l — активная длина проводников якоря (в $м$);

v — линейная скорость проводников якоря $\left(\text{в } \frac{м}{сек}\right)$;

α — угол между направлением скорости движения проводника и направлением вектора магнитной индукции.



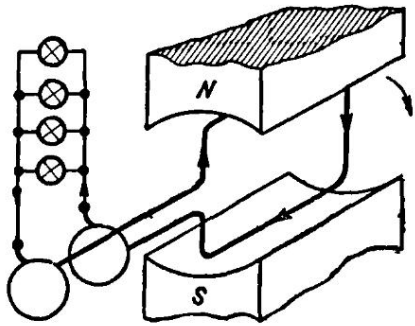
Фиг. 263. Траверса и щеткодержатели

§ 133. Назначение и устройство коллектора в генераторах постоянного тока

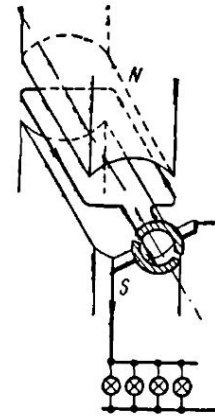
При вращении якоря в магнитном поле полюсов в проводниках его обмотки индуктируется э. д. с., переменная по величине и направлению. Если концы одного витка припаять к двум медным кольцам, на кольца наложить щетки, соединенные с внешней сетью, то при вращении витка в магнитном поле, как показано на фиг. 264, в замкнутой цепи потечет переменный электрический ток. На этом основано действие генераторов переменного тока.

Если же концы витка присоединить к двум медным полуколь-

цам, изолированным друг от друга и называемым пластинами коллектора, и наложить на них щетки, то при вращении витка в магнитном поле, как показано на фиг. 265, в витке будет попрежнему индуктироваться переменная э. д. с. Однако во внешней цепи будет протекать изменяющийся по величине ток постоянного направления (пульсирующий ток). Для установления этого обратимся к фиг. 266. Здесь показан якорь кольцевой формы с одним витком. Начало витка *Н* припаяно к коллекторной пластине *а*, конец витка *К* к пластине *б*. К коллекторным пластинам прижаты две неподвижные щетки, соединенные с внешней сетью. Рассмотрим три характерных положения витка в пространстве между полюсами. В положении *а* (фиг. 266) виток находится в зоне действия северного полюса. Учитывая направление вращения якоря, определяем направление э. д. с.



Фиг. 264. Получение и использование переменного тока



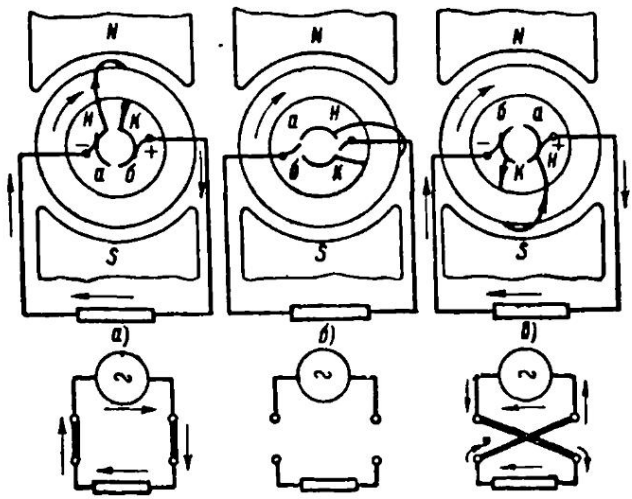
Фиг. 265. Применение коллектора

в витке по правилу правой руки. Необходимо учесть, что э. д. с. индуктируется только в той части витка, которая лежит поверх якоря. Поэтому вследствие плохого использования обмотки кольцевой якорь в настоящее время не применяется. Ток в данном положении направлен от начала витка к концу его. Через правую щетку ток пойдет во внешнюю цепь. Поэтому эту щетку можно назвать положительной. Пройдя сопротивление внешней цепи, ток притекает к левой щетке генератора, которую можно назвать отрицательной.

В положении *б* на фиг. 266 виток находится на нейтральной линии. Нейтральной линией, или геометрической нейтралью, называется линия, проходящая через центр якоря и перпендикулярная оси полюсов. Активная сторона витка в этом положении скользит вдоль магнитных линий, не пересекая

их. Поэтому э. д. с. в витке не наводится и ток в цепи равен нулю. Ширина щетки больше ширины коллекторного деления, образованного пластиной и изолирующим промежутком, и виток, находясь на нейтральной линии, замыкается в этот момент щетками накоротко.

В положении *в* виток находится в зоне действия южного полюса. Определяя направление э. д. с., индуктированной в витке,

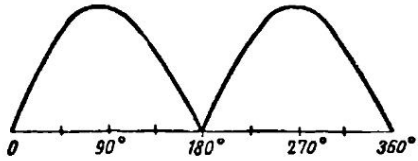


Фиг. 266. Назначение коллектора в генераторах постоянного тока

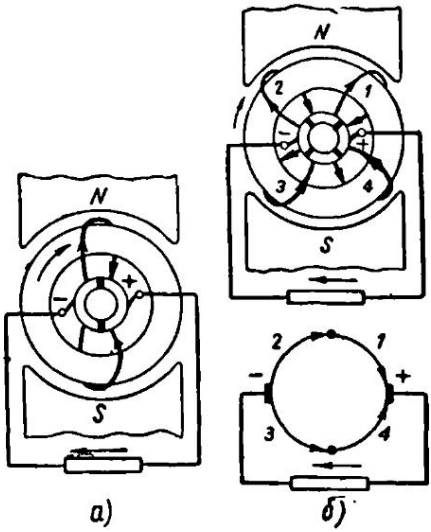
находим, что ток направлен от конца витка к его началу. Если бы коллекторная пластина *а* по-прежнему соприкасалась с левой щеткой, а пластина *б* с правой щеткой, то изменение направления тока в витке вызвало бы перемену тока во внешней цепи. Но этого теперь не случится, так как изменение направления тока в витке после перехода его через нейтральную линию совпадает с таким моментом, когда под правую щетку подошла пластина *а* и под левую щетку — пластина *б*.

Сравнивая первое и третье положения, легко убедиться, что в обоих случаях ток витка во внешнюю сеть притекает от правой, положительной щетки и возвращается из сети к левой, отрицательной щетке. Во внешней сети направление тока не меняется. Так как виток занимает различные положения в магнитном поле, то э. д. с., наводимая в витке, а вместе с ней и ток во внешней сети будут меняться по величине.

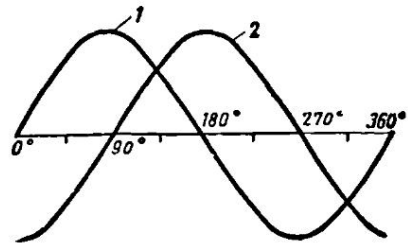
На фиг. 267 показан характер изменения тока во внешней цепи. Такой ток постоянного направления и переменной величины называется пульсирующим. Для увеличения напряже-



Фиг. 267. Пульсирующий ток

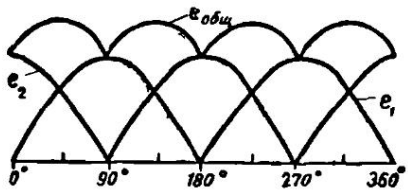


Фиг. 268. Обмотка якоря:
а — одна пара катушек на якоре, *б* — две пары катушек на якоре



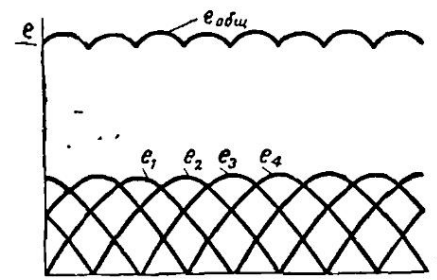
Фиг. 269. Кривые э. д. с. двух соседних катушек на якоре, расположенных так, как показано на фиг. 268, *б*

ния на зажимах машины на якоре наматывают несколько витков (катушек) из большого числа витков изолированной проволоки. Располагая на якоре две катушки, как показано на фиг. 268, *а*, получим параллельное соединение катушек, причем напряжение генератора будет равно напряжению, создаваемому одной катушкой. Ток сети будет равен двойной величине тока, протекающего по каждой катушке. Расположим на якоре четыре катушки, сдвинутые на 90° одна относительно другой, и соединим их между собой последовательно (фиг. 268, *б*). Число коллекторных пластин также увеличим до четырех. Направление индуктированной э. д. с. в катушках определяем по правилу правой руки.



Фиг. 270. Построение суммарной выпрямленной э. д. с. двух катушек

На фиг. 269 показаны кривые э. д. с. катушек *1* и *2*. Так как катушки сдвинуты в пространстве на 90°, то кривые э. д. с. также сдвинуты по фазе на 90°. Кривые э. д. с. у катушек *3* и *4* имеют тот же характер, что и у катушек *1* и *2*, с той лишь разницей, что э. д. с. катушек *1* и *3*, с одной стороны, и катушек *2* и *4*, с другой, равны по величине, но противоположны по направленню. Поэтому для выяснения вопроса ограничимся рассмотрением кривых э. д. с. катушек *1* и *2*. Поскольку катушки соединены между собой последовательно, то мгновенная величина э. д. с. $e_{общ}$, создаваемая двумя катушками, равна сумме мгновенных значений э. д. с. каждой катушки. На фиг. 270 показано сложение мгновенных значений э. д. с. обеих катушек. Кривая суммарной э. д. с. имеет меньшую пульсацию, чем кривые э. д. с. отдельных катушек. Суммарная э. д. с. катушек, находящихся под другим полюсом, имеет ту же величину, но противоположна по направлению суммарной э. д. с. верхних катушек. Обе э. д. с. включены параллельно по отношению к щеткам генератора.

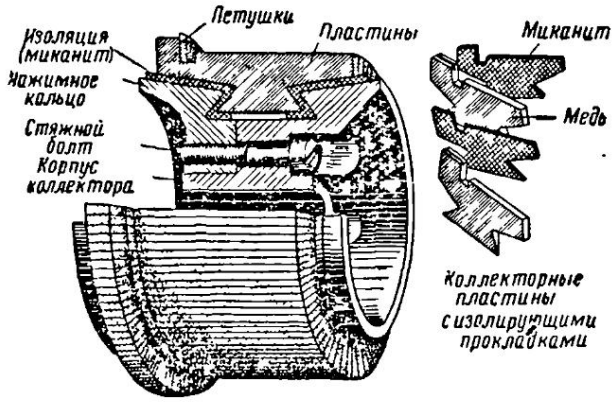


Фиг. 271. Построение суммарной э. д. с. четырех катушек

Восемь катушек, размещенных на якоре, при сложении их мгновенных э. д. с. дадут, как показано на фиг. 271, суммарную э. д. с. $e_{общ}$, пульсации которой будут еще меньше, чем в преды-

дущем случае. Таким образом, размещая на якоре большое число проводников, увеличивая соответственно число коллекторных пластин, можно получить от генератора э. д. с., пульсации которой станут так незначительны, что ток, отдаваемый в сеть, практически можно считать постоянным током. Так, например, уже при 16 катушках на якоре колебания э. д. с. будут менее одного процента. В современных машинах число катушек на якоре бывает свыше ста.

Заканчивая рассмотрение действия коллектора, приходим к выводу, что коллектор в генераторах постоянного тока служит



Фиг. 272. Разрез коллектора

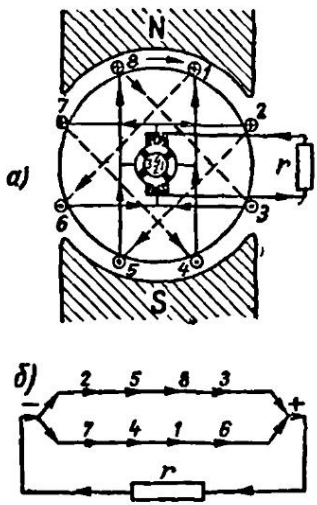
для преобразования переменной э. д. с., индуктируемой в обмотке якоря, в постоянную э. д. с. на щетках генератора. Здесь интересно отметить, что если якорь генератора снабдить и коллектором и контактными кольцами, то от генератора можно получить и постоянное и переменное напряжение.

Коллектор, показанный на фиг. 272, состоит из пластин твердотянутой меди. Между пластинами коллектора прокладываются листочки из миканита (слюды) толщиной 0,5—1 *мм*. Пластины коллектора имеют выступ, напоминающий форму ласточкина хвоста. На вал со стороны якоря надевают изолирующую втулку, которая своим коническим выступом входит в прорезь ласточкина хвоста. С другой стороны коллекторные пластины удерживаются нажимным изолирующим диском, выступы которого также заходят в прорези ласточкина хвоста. Чтобы коллекторные пластины не рассыпались, втулка и нажимной диск стягиваются болтами.

Для припаивания (оловом) проводников обмотки якоря к коллекторным пластинам служат специальные медные пластины, называемые п е т у ш к а м и.

§ 134. Обмотка якоря

Проводники якоря, соединенные по определенной схеме, составляют обмотку якоря. Современные машины постоянного тока имеют якоря барабанного типа с расположенными по окружности пазами, куда укладывается обмотка. Пазы могут быть открытой, полузакрытой и закрытой формы, причем почти исключительно применяются первые две формы пазов. Пазы этой формы позволяют обмотку якоря изготовлять отдельно на металлических или деревянных шаблонах, после чего изолированные хлопчатобумажной лентой или лакотканью и определенным образом изогнутые части обмотки укладываются в пазы. Для повышения электрической прочности изоляцию обмотки пропитывают изоляционным лаком. Такой способ ее изготовления сокращает время сборки машины и удешевляет стоимость обмотки. Перед укладкой обмотки в пазы якоря вставляется пазовая изоляция в виде П-образных коробочек из литероида (тонкая листовая фибра) или прессшпана (электротехнический картон). После укладки обмотки в пазы забивают деревянные или фибровые клинья. Затем на лобовые части якорной обмотки накладывают бандажи из стальной луженой проволоки с последующим их пропаиванием.



Фиг. 273. Обмотки барабанного якоря двухполюсного генератора

Поместим на якоре восемь проводников и пронумеруем их по порядку (фиг. 273, *а*). Пользуясь правилом правой руки и учитывая направление вращения якоря, соединяем проводники между собой так, чтобы э. д. с. в них складывались. Величина э. д. с. при последовательном соединении проводников будет наибольшей в том случае, если проводник, лежащий под серединой одного полюса, соединить с проводником, лежащим под серединой другого полюса, например проводник *8* соединить с проводником *4*, проводник *5* — с проводником *1* и т. д. Два проводника, соединенные последовательно, образуют один виток или одну катушку. Следовательно, восемь проводников на якоре составят четыре катушки. Поэтому коллектор должен иметь четыре пластины. Ширина витка равна при этом полюсному делению или полюсному шагу. Однако необходимость соединить один проводник с другим проводником, также лежащим под серединой другого полюса, и, кроме того,

необходимость включить все проводники в обмотку заставляют ширину витка делать меньше полюсного деления.

В нашем примере проводник *1* соединен с задней стороны якоря с проводником *6*. Это соединение, как не видное со стороны коллектора, показано пунктирной линией. Проводник *6* с передней стороны соединяется с проводником *3* (показано сплошной линией). Далее проводники соединяются *3* с *8*, *8* с *5*, *5* с *2*, *2* с *7*, *7* с *4*, *4* с *1*. Соединения проводников якоря можно изобразить и так: *1---6—3---8—5---2—7---4—1* [1].

В результате все проводники оказались соединенными и обмотка замкнутой. Присоединяя передние торцовые (боковые) соединения проводников к соответствующим коллекторным пластинам, находя направление тока в торцовых соединениях, видим, что от проводников *3* и *6* токи притекают к коллекторной пластине *2*. От пластины *4* коллектора ток разветвляется к проводникам якоря *2* и *7*. Прижимая к коллекторным пластинам *2* и *4* по щетке, соединяя их с внешней сетью, мы дадим возможность току от коллекторной пластины *2* уходить в сеть. Пройдя по сопротивлениям внешней сети, ток возвращается к щетке, прижатой к коллекторной пластине *4*. Далее ток растекается по проводникам обмотки якоря. Щетка, касающаяся коллекторной пластины *2*, будет являться положительной, а щетка, касающаяся пластины *4*, — отрицательной. Сравнивая обмотки кольцевого и барабанного якорей, можно заметить, что у кольцевого якоря щетки стоят на геометрической нейтрали (нейтральной линии), в то время как у барабанного якоря щетки стоят под серединами полюсов.

На фиг. 273, *б* показан путь тока по двум параллельным ветвям, образованным проводниками обмотки для положения якоря, показанного на фиг. 273, *а*. Э. д. с., индуктированные в каждой ветви, равны между собой и направлены в одну сторону. При вращении якоря различные проводники входят в ту или иную параллельную ветвь.

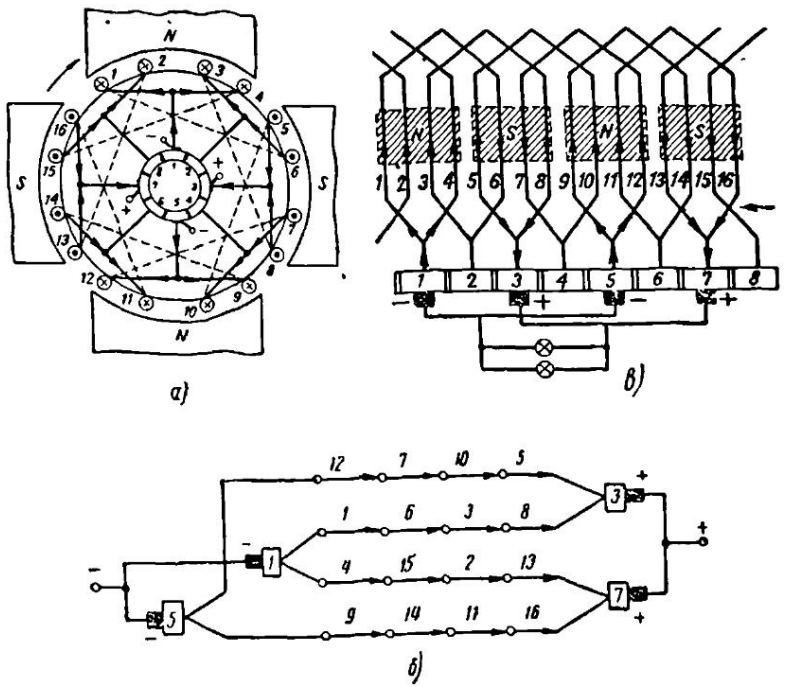
Рассмотрим обмотку якоря четырехполюсного генератора постоянного тока. Поместим на якоре 16 проводников (фиг. 274, *а*), что составит восемь витков или катушек. Коллектор будет состоять из восьми коллекторных пластин. Пользуясь правилом правой руки, учитывая направление вращения якоря, определим направление индуктированной э. д. с. в проводниках. Применяя условную запись соединений проводников, получим: *1---6—3---8—5---10—7---12—9---14—11---16—13---2—15---4—1*.

Все проводники оказались соединенными и обмотка замкнутой. Проставляя направление тока в передних торцовых соединениях, видим, что токи от проводников *5* и *8*, встречаясь, на-

---

[1] Здесь сплошные линии (—) показывают соединение с переднего торца якоря, а пунктирные линии (- - -) соединение с заднего торца.

правляются к коллекторной пластине *3*. К коллекторной пластине *7* притекают токи от проводников *13* и *16*. От пластины *1* коллектора ток растекается по проводникам *1* и *4*. Также от пластины *5* коллектора ток растекается по проводникам *9* и *12*. Щетки, касающиеся пластин *3* и *7* коллектора, будут являться положительными, а щетки, касающиеся пластин *1* и *5*, — отрицательными. Соединяя щетки попарно, выводим на щиток генератора зажимы «плюс» и «минус».



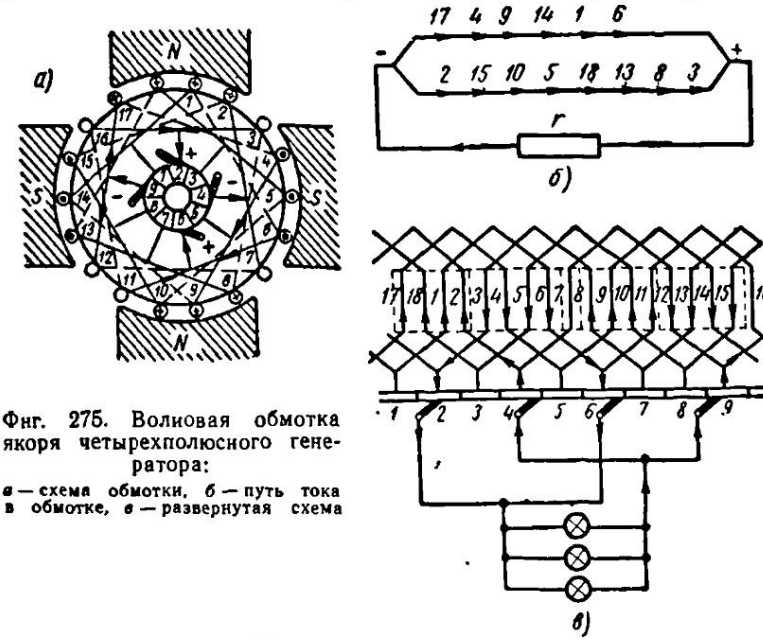
Фиг. 274. Петлевая обмотка якоря четырехполюсного генератора:

а — схема расположения обмотки, *б* — распределение тока в проводниках обмотки, *в* — развернутая схема

На фиг. 274, *б* показан путь тока в проводниках для положения якоря, представленного на фиг. 274, *а*. Обмотка генератора имеет в этом случае четыре параллельные ветви. Ток во внешней сети будет в четыре раза больше тока, протекающего по проводникам обмотки якоря четырехполюсного генератора. Многополюсные генераторы позволяют увеличить мощность, отдаваемую машиной в сеть. Шестиполюсный генератор имел бы шесть параллельных ветвей и шесть щеток (три положительные и три отрицательные).

Часто обмотку показывают в развернутом виде. Развернутая схема обмотки якоря, показанной на фиг. 274, *а*, представлена на фиг. 274, *в*. Рассматривая фиг. 274, *в*, замечаем, что обмотка имеет вид петель, откуда она и получила название петлевой или параллельной, так как обмотка якоря составляет параллельные ветви. Однако петлевая обмотка не является единственной формой выполнения обмотки якоря.

Петлевая обмотка получалась, если проводник, лежащий под одним полюсом, мы соединяли с проводником, лежащим под вторым полюсом, и, идя к третьему проводнику, возвращались

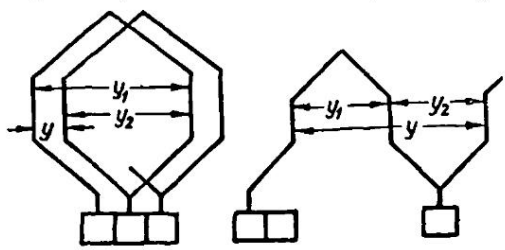


Фиг. 275. Волновая обмотка якоря четырехполюсного генератора:
а — схема обмотки, *б* — путь тока в обмотке, *в* — развернутая схема

под первый полюс. Если же второй проводник соединить с каким-либо проводником, лежащим под следующим (третьим) полюсом, то мы получим другой вид обмотки, форма которой напоминает волну и которая поэтому называется волновой обмоткой.

На фиг. 275, *а* показано выполнение волновой обмотки якоря с 18 проводниками для четырехполюсного генератора. Учитывая направление вращения якоря и используя правило правой руки, определяем направление индуктированной э. д. с. в проводниках обмоток. Применяя условную запись соединений проводников, получим: *1---6—11---16—3---8—13---18—5---10—15---2—7---12—17---4—9---14—1*. Все проводники оказались соединенными и обмотка замкнутой. Передние торцовые соединения соединяем с девятью коллекторными пластинами. К пластинам *2, 4, 6* и *9* прижимаем две положительные и две отри-

цательные щетки. На фиг. 275, *б* показан путь тока в проводниках обмотки для положения якоря, представленного на фиг. 275, *а*. Рассматривая фиг. 275, *б*, отмечаем наличие только двух параллельных ветвей, образованных обмоткой якоря. Оказывается, что при выполнении волновой обмотки генератора с любым числом полюсов обмотка может иметь лишь две параллельные цепи. В отличие от петлевой, параллельной обмотки, где число параллельных ветвей якоря равно числу полюсов, волновая обмотка называется последовательной. Для положения якоря, представленного на фиг. 275, *а*, витки *7—12* и *11—16* не участвуют в создании э. д. с. генератора, так как они замкнуты накоротко щетками. Ток в замкнутых витках невелик, если учесть, что они находятся около нейтральной зоны и индуктированная э. д. с. в них очень мала. На фиг. 275, *в*, показана развернутая схема обмотки для положения якоря, представленного на фиг. 275, *а*.



Фиг. 276. Вычисление шага у петлевой и волновой обмоток

При устройстве генераторов на большое напряжение отдают предпочтение волновой обмотке. Неравномерность воздушного зазора, различие формы полюсных наконечников, неправильное центрирование якоря вызывают появление в проводниках обмотки якоря различных по величине э. д. с. Так как элементы петлевой обмотки лежат под одним полюсом, то это приведет к различным э. д. с. отдельных параллельных ветвей, что вызовет протекание по обмотке якоря уравнительных токов. Волновая обмотка лишена этого недостатка. Неравномерность магнитной системы, имеющая место вследствие различия потоков отдельных магнитных цепей, обусловленного эксцентричным положением якоря относительно полюсов и раковинами, получающимися при отливке станины, мало отражается на волновой обмотке, так как ее секции располагаются под различными полюсами. Поэтому указанная неравномерность почти одинаково влияет на величины э. д. с., наводящиеся в параллельных ветвях обмотки якоря. В машинах большой мощности и низкого напряжения, когда ток, отдаваемый генератором в сеть, велик, выгоднее разбить обмотку якоря на большое число параллельных ветвей, т. е. выполнить петлевую обмотку.

Часть обмотки (фиг. 276), заключающаяся при ее обходе между двумя коллекторными пластинами, расположенными одна за другой, называется секцией. Секция состоит из двух активных сторон, каждая из которых делается из одного или не-

скольких проводников. Расстояние по окружности якоря между начальной и конечной активной стороной секции называется первым частичным шагом (y_1), а расстояние между конечной активной стороной одной секции и начальной стороной следующей секции — вторым частичным шагом (y_2). Расстояние между начальными активными сторонами двух соседних секций называется результирующим шагом (y).

На фиг. 276 представлены секции петлевой и волновой обмоток. Как видно из чертежа, результирующий шаг петлевой обмотки равен разности частичных шагов:

$$y = y_1 - y_2.$$

Результирующий шаг волновой обмотки равен сумме частичных шагов:

$$y = y_1 + y_2.$$

Возвращаясь к петлевой обмотке якоря, изображенной на фиг. 274, *а*, находим, что для этой обмотки первый частичный шаг равен пяти, второй частичный шаг — трем [1]. Производя намотку с первого проводника, получаем:

$$1+5=6;\ 6-3=3;\ 3+5=8;\ 8-3=5 \text{ и т. д.}$$

Для волновой обмотки, изображенной на фиг. 275, *а*, получаем: $y_1=5$; $y_2=5$, поэтому, производя намотку с первого проводника, имеем:

$$1+5=6;\ 6+5=11;\ 11+5=16;\ 16+5=21;\ 21-18=3 \text{ и т. д.}$$

Активные стороны одной секции обычно состоят из нескольких проводников. В этом случае проводники одной секции совместно изолируются и укладываются в соответствующие пазы.

§ 135. Величина э. д. с., индуктированной в якоре генератора постоянного тока

Выведем формулу, с помощью которой можно определить величину э. д. с., индуктированной в машине постоянного тока.

Как известно, величина индуктированной э. д. с. пропорциональна скорости изменения магнитного потока по времени:

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

За один оборот якоря двухполюсного генератора каждый проводник обмотки якоря дважды пересекает магнитное поле машины. Если скорость вращения машины $\frac{n}{60}$ *об/сек*, то число

[1] За единицу здесь принято расстояние между двумя смежными проводниками по окружности якоря.

магнитных линий, пересекаемых проводником в единицу времени, будет:

$$2\Phi \frac{n}{60}.$$

Следовательно, величина э. д. с. будет равна:

$$e = 2\Phi \frac{n}{60} в.$$

Если обмотка якоря имеет две параллельные цепи, то из общего числа проводников якоря N в состав каждой ветви будет входить $\frac{N}{2}$ проводников. Э. д. с., индуктированная в каждой ветви, определится из следующего выражения:

$$e = 2\Phi \frac{n}{60} \cdot \frac{N}{2} в.$$

До сих пор мы рассматривали генератор с двумя полюсами, у которого $p = 1$ или $2p = 2$. У машины с $2p$ полюсами число магнитных линий, пересекаемых проводником за один оборот якоря, будет не 2Φ, а $2p\Phi$.

Величина индуктированной э. д. с. при этом будет равна:

$$e = 2p\Phi \frac{n}{60} \cdot \frac{N}{2} в.$$

Если обмотка якоря имеет не две параллельные ветви ($a = 1$, $2a = 2$), а $2a$ ветвей, то число проводников в каждой ветви будет $\frac{N}{2a}$ и э. д. с. генератора определяется по выражению:

$$e = 2p\Phi \frac{n}{60} \cdot \frac{N}{2a} в.$$

Окончательно э. д. с. генератора постоянного тока может быть рассчитана по формуле:

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \Phi N.$$

Пример 1. Определить э. д. с. генератора, для которого дано:

$$\Phi_{полез} = 0{,}0368 \text{ } в\text{-}сек; \; N = 500; \; n = 750 \text{ } об/мин;$$

$$2p = 6; \; 2a = 6.$$

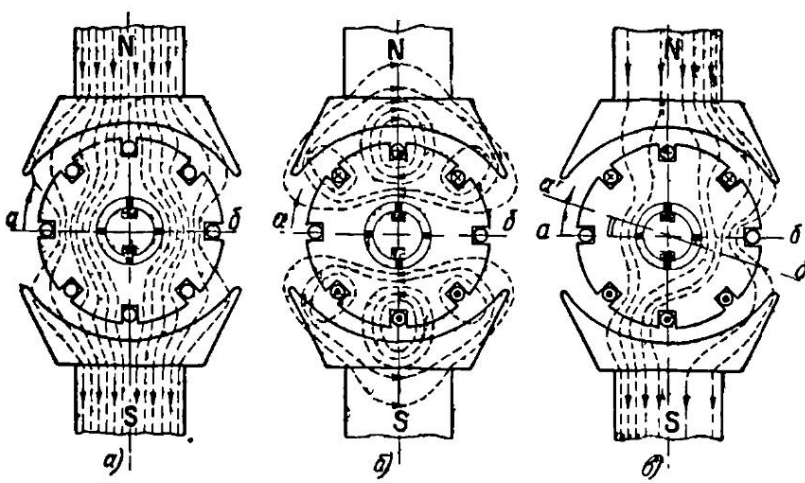
$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} \Phi N = \frac{3}{3} \cdot \frac{750}{60} \cdot 0{,}0368 \cdot 500 = 230 \text{ } в.$$

§ 136. Реакция якоря. Коммутация. Дополнительные полюса

При работе генератора вхолостую, в зависимости от типа генератора, ток якоря очень мал или равен нулю. В этом случае магнитное поле, создаваемое обмоткой полюсов (обмоткой возбуждения) для двухполюсного генератора, имеет вид, представленный на фиг. 277, *а*. Как было указано выше, линия, проведенная через середину полюсных наконечников, называется осью полюсов. Ось магнитного поля совпадает с осью полюсов.

Линия, перпендикулярная оси магнитного поля, — физическая нейтраль — в данном случае совпадает с геометрической нейтралью (линией *а* — *б*).

При работе генератора на внешнюю сеть по обмотке якоря машины будет протекать ток, создающий свое магнитное поле — поле якоря (фиг. 277, *б*). Наложение двух магнитных полей —



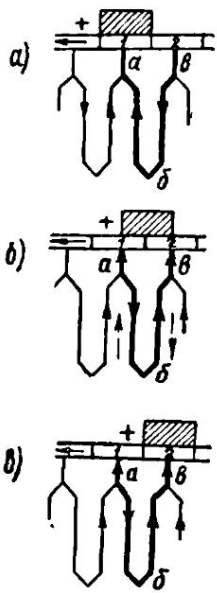
Фиг. 277. Реакция якоря генератора постоянного тока

поля полюсов и поля якоря — приводит к образованию результирующего магнитного поля. На фиг. 277, *в* показана картина результирующего магнитного поля генератора. Действие магнитного поля якоря на поле полюсов называется реакцией якоря. Поле якоря, действуя на магнитное поле полюсов, приводит:

1. К размагничиванию набегающего края полюса, где направления магнитных линий полей полюса и якоря противоположны, и к подмагничиванию сбегающего края полюса, где магнитные линии полей полюса и якоря направлены в одну сторону. При небольшой величине магнитной индукции в сердечнике полюса размагничивание одной половины полюса происходит настолько же, насколько подмагничивается другая половина.

При большой величине индукции вследствие магнитного насыщения ослабление магнитного потока у одной половины полюса не компенсируется усилением его у другой половины, в результате чего магнитный поток генератора уменьшается и напряжение машины падает.

2. К искажению поля машины и смещению физической нейтрали в сторону вращения генератора (положение *а′* и *б′* на фиг. 277, *в*). Величина угла смещения физической нейтрали зависит от величины магнитного поля якоря, которая, в свою очередь, зависит от тока в обмотке якоря, т. е. от нагрузки генератора.



Фиг. 278. Коммутация тока в секции

3. К необходимости сдвига щеток в сторону вращения якоря во избежание сильного искрообразования. Для того чтобы при непрерывном изменении нагрузки генератора не передвигать все время щетки, применяют специальные дополнительные полюсы, действие которых будет нами разобрано ниже.

При вращении якоря генератора проводники обмотки переходят из одной параллельной ветви в другую. Это происходит в тот момент, когда секции обмотки, минуя один полюс, пересекают физическую нейтраль и входят в зону действия соседнего разноименного полюса. Направление индуктированной в секции э. д. с. меняется на обратное. Процесс переключения секций обмотки из одной параллельной цепи в другую и связанные с ним явления называются коммутацией. В течение некоторого времени (*периода коммутации*) в коммутируемой секции, проходящей зону коммутации, ток меняет свое направление на обратное. Как известно, каждое изменение тока в проводнике вызывает изменение магнитного поля, что приводит к возникновению в проводнике э. д. с. самоиндукции. По правилу Ленца э. д. с. самоиндукции стремится задержать изменение тока в секции обмотки, вследствие чего процесс коммутации затягивается.

Величина э. д. с. самоиндукции зависит от индуктивности коммутируемой секции и скорости изменения тока в ней.

Так как процесс коммутации очень сложен, то, не имея возможности здесь подробнее объяснить это явление, мы попытаемся представить его в упрощенном виде. На фиг. 278, *а* показана секция обмотки *абв*, находящаяся в зоне коммутации. Ток из двух соседних параллельных ветвей притекает к коллекторной пластине *1* и через положительную щетку уходит во внешнюю

сеть. Для простоты возьмем ширину щетки, равную ширине коллекторной пластины. В положении, показанном на фиг. 278, *б* секция *абв* переместилась в сторону и щетка стала касаться коллекторной пластины *2*. Сравнивая оба положения секции, замечаем, что направление тока в проводниках изменилось. Если раньше ток протекал от *в* к *а*, то во втором случае он протекает от *а* к *в*. Изменение тока в проводниках произошло за время, в течение которого щетка перешла с одной коллекторной пластины на другую.

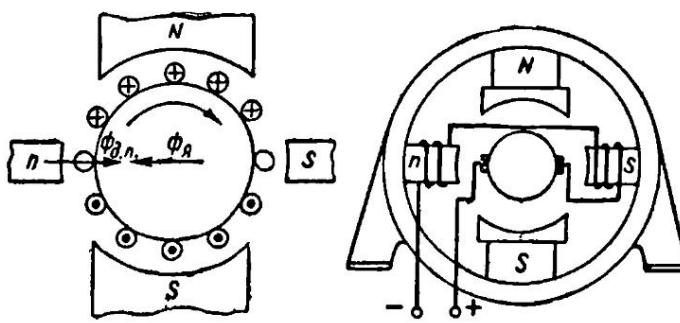
На фиг. 278, *в* показано промежуточное положение коммутируемой секции при переходе щетки с коллекторной пластины *1* на пластину *2*.

В то время, когда щетка в равной мере перекрывала коллекторные пластины *1* и *2*, секция обмотки *абв* находилась на физической нейтрали. Если бы процесс коммутации не сопровождали сложные побочные явления, то в секции обмотки ток был бы равен нулю. В этом случае в соединительных проводниках *а* и *в* протекали бы токи, обратно пропорциональные переходным сопротивлениям между щеткой и коллекторными пластинами, или, иначе говоря, прямо пропорциональные площадям соприкосновения щетки с коллекторными пластинами. В положении, когда одна половина щетки касалась пластины *1*, а другая — пластины *2*, через соединительные проводники *а* и *в* проходили одинаковые токи, в сумме равные току, уходящему от положительной щетки в сеть. По мере того как щетка будет сходить с пластины *1* и находить на пластину *2*, площадь соприкосновения щетки с пластиной *1* станет уменьшаться, а с пластиной *2* — увеличиваться. Это вызовет соответственно уменьшение тока в проводнике *а* и увеличение тока в проводнике *в*. Ток в секции обмотки будет увеличиваться. В действительности процесс коммутации усложняется появлением в секции обмотки э. д. с. самоиндукции, которая по правилу Ленца создает ток, направленный в данном случае против тока в проводниках секции. На фиг. 278, *б* направление тока, порождаемого э. д. с. самоиндукции, показано пунктирными стрелками. Из чертежа видно, что в соединительном проводнике *а* токи имеют одно направление, в проводнике *в* — разное направление. Это приводит к увеличению плотности тока под сбегающим краем щетки и уменьшению плотности тока под набегающим краем щетки. Увеличение плотности тока в щетке приводит к перегреву ее и образованию искр на коллекторе, которые могут вызвать порчу коллектора.

Искрение щеток могут вызвать и другие причины, как, например: плохое состояние поверхности коллектора, загрязнение коллектора и щеток, вибрация машины, большая разность потенциалов между соседними пластинами коллектора, перегрузка генератора.

Секция обмотки, приближаясь к зоне коммутации, имеет направление тока, соответствующее направлению индуктированной

э. д. с. той параллельной ветви, откуда секция выходит. Для хорошей коммутации необходимо, чтобы в секции, попавшей на физическую нейтраль и замкнутой щеткой накоротко, ток был бы равен нулю. Но возникающая в секции э. д. с. самоиндукции, направленная по правилу Ленца в ту же сторону, что и э. д. с. в проводниках, будет мешать изменению тока, стараясь сохранить прежнюю величину и направление тока. Отсюда становится понятным стремление прекратить действие э. д. с. самоиндукции. Для этой цели щетки генератора сдвигают с физической нейтрали на некоторый угол в сторону вращения якоря. В коммутируемом элементе, попавшем в магнитное поле другой полярности, будет индуктироваться э. д. с., имеющая направление, обратное э. д. с. самоиндукции. Так как величина э. д. с. самоиндукции зависит от величины тока в проводниках обмотки, или, иначе говоря, от нагрузки генератора, то при различной нагрузке в коммутируемой секции будет возникать различная по величине э. д. с. самоиндукции.



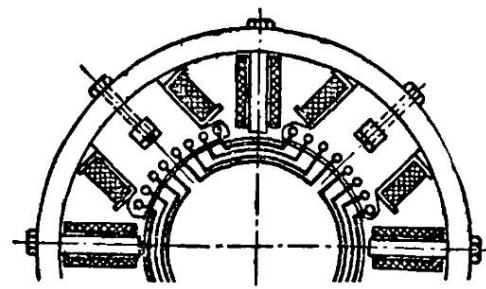
Фиг. 279. Дополнительные полюсы и их включение

Чтобы обеспечить постоянное компенсирование э. д. с. самоиндукции, пришлось бы непрерывно менять положение щеток, что практически невыполнимо. Поэтому современные конструкции машин постоянного тока имеют дополнительные полюсы, располагаемые между главными полюсами. Щетки в этом случае устанавливаются на геометрической нейтрали. Магнитное поле, создаваемое дополнительными полюсами, индуктирует в проводниках, проходящих зону коммутации, э. д. с., направленную против э. д. с. самоиндукции, тем самым обеспечивая хорошую коммутацию и устраняя искрение щеток.

Чтобы компенсировать изменяющуюся с нагрузкой э. д. с. самоиндукции, необходимо, чтобы магнитное поле дополнительных полюсов изменялось пропорционально нагрузке генератора. Для этой цели обмотка дополнительных полюсов включается последовательно с обмоткой якоря.

На фиг. 279 показано расположение и включение обмотки дополнительных полюсов. Из чертежа видно, что у генератора за главным полюсом в сторону вращения якоря располагается разноименный дополнительный полюс. Магнитное поле дополнительных полюсов имеет направление, противоположное полю самого якоря, и уравновешивает его.

Для генераторов, работающих с резко изменяющейся нагрузкой (подъемники, краны, прокатные станы), применяют иногда компенсационную обмотку, закладываемую в пазы, специально сделанные в полюсных наконечниках. Направление тока компенсационной обмотки должно быть противоположно току в проводниках обмотки якоря. На дуге, охватываемой полюсным наконечником, магнитное поле компенсационной обмотки будет уравновешивать поле реакции якоря, не допуская искажения поля машины. Компенсационная обмотка, так же как обмотка дополнительных полюсов, включается последовательно с обмоткой якоря. На фиг. 280 показана схема компенсационной обмотки.



Фиг. 280. Схема компенсационной обмотки

§ 137. Типы генераторов постоянного тока

В зависимости от способа создания магнитного поля генераторы постоянного тока делятся на три группы: 1) генераторы с постоянными магнитами, или магнитоэлектрические; 2) генераторы с независимым возбуждением; 3) генераторы с самовозбуждением.

Магнитоэлектрические генераторы состоят из одного или нескольких постоянных магнитов, в поле которых вращается якорь с обмоткой. Ввиду очень малой вырабатываемой мощности генераторы этого типа для промышленных целей не применяются.

У генератора с независимым возбуждением обмотки полюсов питаются от постороннего, не зависимого от генератора, источника постоянного напряжения (генератора постоянного тока, выпрямителя и др.).

Питание обмотки возбуждения полюсов генератора с самовозбуждением осуществляется со щеток якоря самой машины. Принцип самовозбуждения заключается в следующем. При отсутствии тока в обмотке возбуждения якорь генератора вращается в слабом магнитном поле остаточного магнетизма полю-

сов. Незначительная э. д. с., индуктируемая в обмотке якоря в этот момент, посылает слабый ток в обмотку полюсов. Магнитное поле полюсов увеличивается, отчего э. д. с. в проводниках якоря также увеличивается, что, в свою очередь, вызовет увеличение тока возбуждения. Так будет продолжаться до тех пор, пока в обмотке возбуждения не установится ток, соответствующий величине сопротивления цепи возбуждения. Самовозбуждение машины может произойти лишь в том случае, если ток, протекающий по обмотке полюсов, будет создавать магнитное поле, усиливающее поле остаточного магнетизма, и если, кроме того, сопротивление цепи возбуждения не превышает некоторой определенной величины.

Генераторы с самовозбуждением, в зависимости от способа соединения обмотки возбуждения с обмоткой якоря, делятся на три типа:

1. Генератор с параллельным возбуждением (шунтовой), у которого обмотка возбуждения полюсов включена параллельно обмотке якоря.

2. Генератор с последовательным возбуждением (сериесный), у которого обмотка возбуждения полюсов включена последовательно с обмоткой якоря.

3. Генератор со смешанным возбуждением (компаундный), у которого на полюсах имеются две обмотки: одна, включенная параллельно обмотке якоря, и другая, включенная последовательно с обмоткой якоря.

В зависимости от способа соединения обмотки возбуждения с обмоткой якоря генератор обладает своими особенностями, своими присущими только ему свойствами.

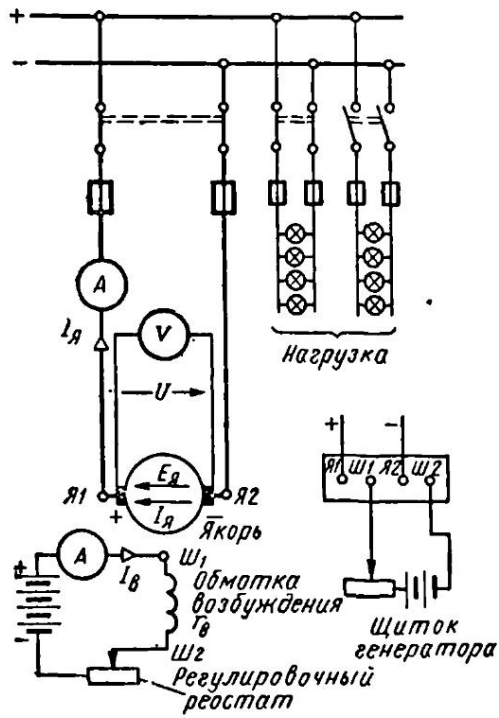
§ 138. Генератор с независимым возбуждением

Схема генератора этого типа дана на фиг. 281. Ток возбуждения, подаваемый от постороннего источника напряжения в обмотку возбуждения полюсов, не зависит от условий работы самого генератора. Реостат в цепи возбуждения позволяет менять величину тока возбуждения, что приводит к изменению магнитного потока машины, а это, в свою очередь, ведет к изменению э. д. с. или напряжения генератора. Этот реостат часто называют регулировочным. Реостат имеет третий добавочный контакт, позволяющий при выключении обмотки возбуждения замыкать ее накоротко. Этим предохраняются последние контакты реостата от обгорания, так как при выключении цепи, содержащей большую индуктивность, быстро исчезающий ток вызывает э. д. с. самоиндукции, поддерживающую дугу между рычагом и последним контактом реостата.

Обмотка возбуждения состоит из большого числа витков медной изолированной проволоки. При постоянном числе оборо-

тов якоря и отсутствии нагрузки генератора (холостом ходе) э. д. с. машины зависит только от тока возбуждения. Изменяя сопротивление цепи возбуждения регулировочным реостатом, замечая показания амперметра в цепи возбуждения и вольтметра, подключенного к щеткам генератора, устанавливаем зависимость между э. д. с. генератора при холостом ходе машины и током возбуждения. Эта зависимость представляется кривой, называемой характеристикой холостого хода (фиг. 282).

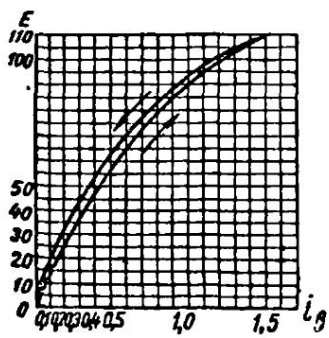
При первом намагничивании генератора и при отсутствии тока возбуждения ($I_в = 0$) вольтметр машины покажет нуль при



Фиг. 281. Схема генератора с независимым возбуждением

любом числе оборотов якоря. Увеличение тока возбуждения будет сопровождаться вначале пропорциональным увеличением э. д. с. генератора. Соответствующая часть характеристики холостого хода будет прямолинейной. Но дальнейшее увеличение тока возбуждения вызовет магнитное насыщение машины, отчего

кривая будет иметь изгнб. Если теперь уменьшать ток возбуждения генератора, то можно заметить, что при тех же самых значениях тока возбуждения э. д. с. генератора будет иметь бо́льшие значения, чем при намагничивании, и кривая размагничивания пройдет несколько выше, чем кривая намагничивания. Это объясняется явленнем гистерезиса. При уменьшении тока возбуждеиня до нуля генератор за счет остаточного магнетизма будет иметь некоторую э. д. с. Чем дальше за перегибом характернстики лежнт точка, соответствующая э. д. с. генератора при нормальной работе, тем меньше изменяется э. д. с. машины в зависимостн от тока возбуждения. Возможность регулнровки напряжения в случае работы машнны за перегибом характеристнки невелнка. Наоборот, если генератор будет работать на прямолннейной частн характеристики, то небольшие изменения тока возбуждения вызовут значительные изменения э. д. с. генератора. Таким образом, характеристика холостого хода показывает магнитные свойства генератора.



Фнг. 282. Характеристика холостого хода генератора с независимым возбуждением

Основным требованием к любому генератору является постоянство напряжения при разлнчных нагрузках. Но так как при работе генератора на внешнюю сеть напряжение его с нагрузкой изменяется, то лучшей машиной будет та, которая меньше изменяет напряжение при одинаковых измененнях нагрузки.

Напряжение генератора с независимым возбуждением изменяется с нагрузкой от двух причин:

1. Вследствне падения напряжения в обмотке якоря и переходном контакте щеток.

Э. д. с. генератора (E) отлнчается от напряжения на щетках (U) на величину падения напряжения в обмотке якоря $I_я r_я$.

$$E = U + I_я r_я \text{ или } U = E - I_я r_я.$$

Если, напрнмер, э. д. с. генератора равна 120 *в*, а сопротивление обмотки якоря равно 0,01 *ом*, то при токе генератора 50 *а* напряжение машины будет:

$$U = E - I_я r_я = 120 - 50 \cdot 0{,}01 = 119{,}5 \text{ в},$$

при токе 100 *а*

$$U = 120 - 100 \cdot 0{,}01 = 119 \text{ в}.$$

при токе 200 *а*

$$U = 120 - 200 \cdot 0{,}01 = 118 \text{ в}.$$

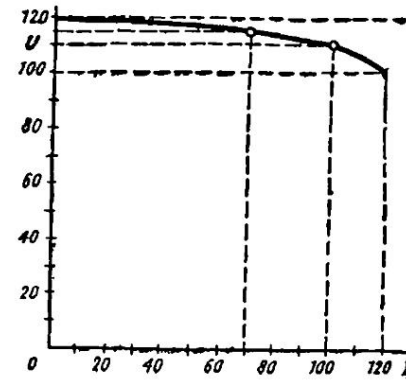
Из этих примеров видно, что с увеличением нагрузки генератора напряжение его уменьшается. Чтобы уменьшить падение напряжения в сопротивлении $r_я$, обмотку якоря машин постоянного тока изготовляют из медной проволоки и стержней большого сечения. Сопротивление обмотки якоря получается в этом случае очень малым, порядка десятых, сотых и даже тысячных долей ома.

При холостой работе генератора $I_я = 0$, поэтому

$$U = E.$$

2. Второй причиной уменьшения напряжения у генератора с независимым возбуждением при увеличении его нагрузки является действие реакции якоря, приводящее к уменьшению магнитного потока и э. д. с. машины.

Если постепенно нагружать генератор, отмечая по показаниям амперметра, включенного в цепь якоря, величину тока нагрузки, оставляя неизменным скорость вращения генератора и ток возбуждения, то можно получить зависимость напряжения на зажимах машины от тока нагрузки. Эта зависимость называется **внешней характеристикой**. На фиг. 283 показана внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением. По горизонтальной оси отложен ток нагрузки, по вертикальной оси — напряжение генератора. Характеристика показывает, как меняется напряжение генератора с изменением нагрузки. У генераторов с независимым возбуждением при номинальной нагрузке, постоянной скорости и постоянном токе возбуждения понижение напряжения может составлять 5—8% от номинального. Для поддержания напряжения генератора постоянным изменяют ток возбуждения при помощи регулировочного реостата.

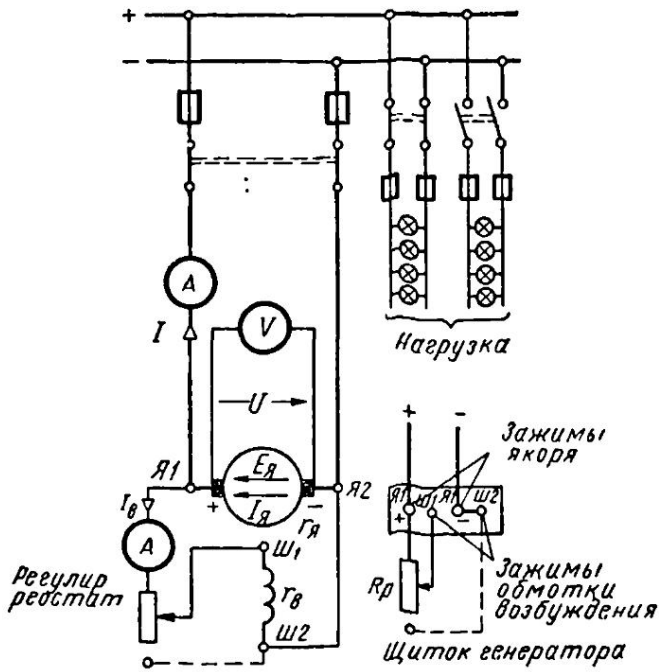


Фиг. 283. Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением

Как видно из фиг. 281, в цепь якоря генератора включены плавкие предохранители, которые защищают обмотку якоря, если короткое замыкание происходит во внешней сети. Изменение направления вращения генератора с независимым возбуждением приводит к изменению полярности щеток.

§ 139. Генератор с параллельным возбуждением

На фиг. 284 дана схема генератора с параллельным возбуждением. Обмотка возбуждения полюсов включена параллельно обмотке якоря. Во время работы генератора ток, проходящий по обмотке якоря $I_я$, от положительной щетки растекается по двум параллельным ветвям: внешней сети и обмотке возбужде-



Фиг. 284. Схема генератора с параллельным возбуждением

ния. Ток сети I и ток возбуждения $I_в$, притекая к отрицательной щетке, в сумме своей равны току якоря. Поэтому можно написать:

$$I_я = I + I_в.$$

Полезная мощность генератора характеризуется величиной тока, отдаваемого генератором в сеть. Поэтому ток возбуждения должен быть по возможности малым. Обычно ток возбуждения у генераторов с параллельным возбуждением составляет 2,5% от номинального тока якоря. Для создания необходимой намагничивающей силы обмотка возбуждения изготовляется из большого числа витков тонкой медной изолированной проволоки.

Если при холостом ходе генератора менять ток возбуждения

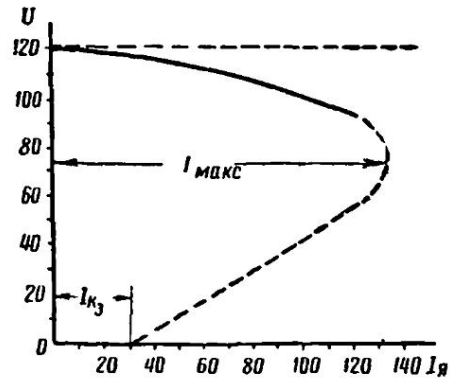
регулировочным реостатом, то при постоянной скорости якоря э. д. с. генератора будет также меняться. Зависимость между э. д. с. и током возбуждения машины, как известно, называется характеристнкой холостого хода. У генератора с параллельным возбуждением эта характеристика аналогична характеристике холостого хода генератора с независнмым возбуждением.

При нагрузке генератора с параллельным возбуждением напряжение его меняется в завнсимости от тока нагрузки. У генератора с параллельным возбуждением напряжение с нагрузкой меняется от трех прнчнн:

1) вследствие падения напряжения в обмотке якоря и переходном контакте щеток;

2) вследствие уменьшения магнитного потока, вызванного действием реакции якоря;

3) под действием первых двух прнчнн напряженне генератора (нли напряженне на щетках якоря) с нагрузкой уменьшается. Ток возбуждения при постоянном сопротнвлении цепи возбуждения пропорционален напряжению на щетках якоря. Поэтому с уменьшением напряжения на якоре ток возбуждения также уменьшится, что приведет к уменьшению магнитного потока полюсов, а это, в свою очередь, вызовет дополнительное уменьшение э. д. с. и напряжения на зажимах генератора.



Фиг. 285. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением

Этого не было у генератора с независимым возбуждением, так как обмотка возбуждення машины пнталась от независимого (отдельного) источнпка постоянного напряжения.

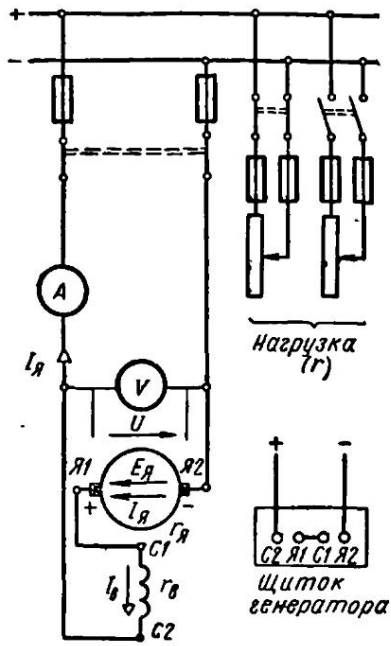
Если при постоянной скорости вращення якоря и неизменном сопротивлении цепн возбуждения менять сопротивление внешней сети, то ток сети будет также меняться. Отмечая велнчину тока сети по амперметру, включенному в цепь якоря, и определяя напряжения генератора по вольтметру, включенному на зажимы машины, можно установить завнсимость между током нагрузки и напряжением генератора. Эта зависимость, как нзвестно, называется внешней характеристикой. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбужденнем дана на фиг. 285. Характеристика показывает, что с увеличением нагрузки напряжение генератора уменьшается. В пределах нормальной работы уменьшение напряжения с нагрузкой у генераторов этого типа бывает невелико (сплошная часть характеристики). У генераторов с дополнительными полюсамн оно составляет 8—15% при

номинальной нагрузке. При работе генератора изменение напряжения устраняют путем изменения сопротивления цепи возбуждения с помощью регулировочного реостата. Дальнейшее увеличение тока нагрузки сопровождается значительным уменьшением напряжения (пунктирная часть характеристики). При некоторой величине сопротивления внешней цепи ток нагрузки достигает максимального критического значения $I_{макс}$, по достижении которого ток начинает уменьшаться, даже если сопротивление внешней цепи будет становиться меньше. Это объясняется тем, что на величину тока сети оказывает влияние не только величина сопротивления сети, но также и напряжение генератора. Как только ток сети достигнет критического значения $I_{макс}$, вышеуказанные факторы, влияющие на уменьшение напряжения, становятся преобладающими и, несмотря на уменьшение сопротивления сети, ток сети будет уменьшаться.

При коротком замыкании напряжение генератора становится равным нулю, а э. д. с., наводимая в обмотке якоря за счет остаточного магнетизма полюсов, будет создавать в цепи ток короткого замыкания. Иногда случается, что впервые включаемый генератор с параллельным возбуждением не дает напряжения. Это может произойти потому, что сердечники полюсов не имеют остаточного магнетизма или обладают им, но неправильное соединение обмотки возбуждения привело к тому, что ток в обмотке создал магнитный поток возбуждения, направленный против потока остаточного магнетизма, и произошло размагничивание полюсов. В этом случае концы обмотки возбуждения нужно отсоединить и подключить их на некоторое время к источнику постоянного напряжения (например, к аккумуляторной батарее). Этого будет достаточно для приобретения полюсами остаточного магнетизма, и генератор будет создавать небольшую э. д. с. при работе с отключенной обмоткой полюсов. Если генератор включают впервые и нет уверенности в правильном присоединении обмотки возбуждения, то, пустив его в ход, касаются концами обмотки возбуждения якорных выводов на щитке (соблюдая правила техники безопасности) и наблюдают за показаниями вольтметра генератора. Если показания вольтметра увеличиваются, то это означает, что обмотка возбуждения соединена правильно. Если же показания вольтметра уменьшаются, то нужно поменять местами концы обмотки возбуждения. После установления правильности включения обмотки возбуждения генератор останавливают и прочно закрепляют концы обмотки возбуждения на его щитке. Изменение направления вращения генератора с параллельным возбуждением влечет за собой изменение направления индуктированной э. д. с. в обмотке якоря, перемену полярности щеток и изменение направления тока в обмотке возбуждения, а это приводит к размагничиванию полюсов. Поэтому на генераторах с параллельным возбуждением указывают направление вращения якоря.

§ 140. Генератор с последовательным возбуждением

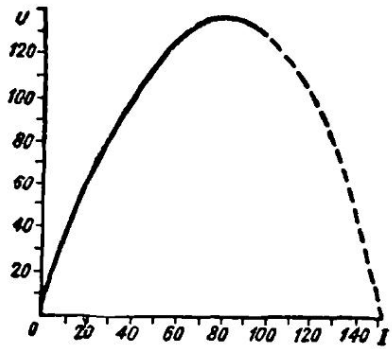
На фиг. 286 показана схема генератора с последовательным возбужденнем. Так как обмотка возбуждения этого типа генератора включена последовательно с обмоткой якоря, то при $a=1$ по обеим обмоткам протекает одинаковый ток. Поэтому



Фиг. 286. Схема генератора с последовательным возбуждением

обмотка возбуждения машин средней и большой мощности в отличие от машин с параллельным возбуждением изготовляется из незначительного числа витков проволоки большого сечения. При разомкнутой внешней цепи генератор с последовательным возбуждением возбудить нельзя. Поэтому у этого генератора снять характеристику холостого хода обычным путем не представляется возможным. При замыкании внешней цепи по обмотке якоря, а также по обмотке возбуждения будет проходить ток нагрузки. При этом с увеличением нагрузки генератора будет увеличиваться магнитный поток полюсов, который приведет к возрастанию э. д. с. и напряжения генератора. Поэтому внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением будет

такова, как показано на фнг. 287 (оплошная часть характеристики). Таким образом, мы видим, что генератор с последовательным возбуждением по своим свойствам отличается от генератора с параллельным возбуждением, так как у первого с увеличеннем нагрузки напряжение увеличнвается, а у второго — уменьшается. С увелнчением тока нагрузкн наступает иасыщеиие магнитной системы, э. д. с. генератора почти не увеличивается, а напряженне машины начинает уменьшаться. Это происходит вследствие усиления реакции якоря и падения напряжения в обмотках генератора (пунктирная часть характеристики на фиг. 287). При коротком замыкании зажнмов якоря ток генератора будет иметь значительную величину, а напряжение его будет равно нулю. Внешняя характеристика генератора с последовательным возбуждением показывает, что с изменением тока нагрузки напряжение машины резко нзменяется. Поэтому генераторы этого тнпа на практике применяются редко.

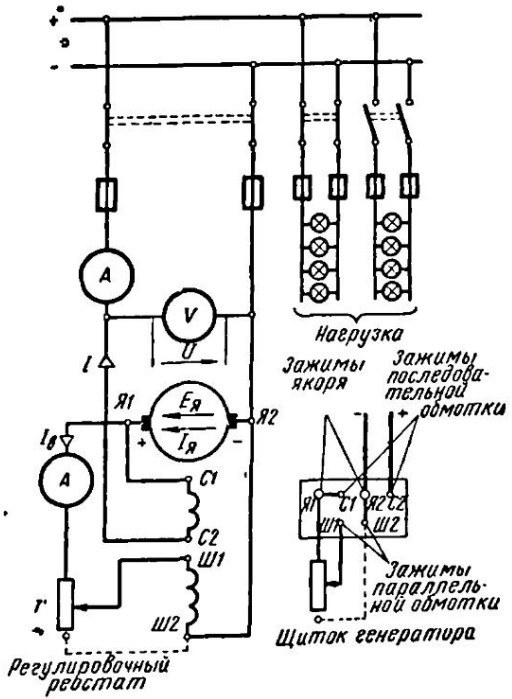


Фиг. 287. Внешняя характеристика генератора с последовательным возбужденнем

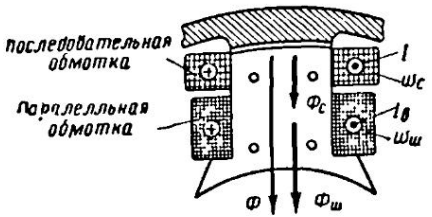
§ 141. Генератор со смешанным возбуждением

Схема генератора со смешанным возбужденнем дана на фнг. 288. Обладая двумя обмотками на своих главных полюсах (фиг. 289), генератор этого типа объединяет в себе свойства генераторов с параллельным и последовательным возбуждением. Характеристнка холостого хода генератора со смешанным возбуждением похожа на характеристику холостого хода генератора с параллельным возбуждением, так как при холостом ходе последовательная обмотка не работает. Если напряжение у генератора с параллельным возбуждением с нагрузкой уменьшается, а у генератора с последовательным возбуждением увелнчивается, то, подбирая число витков параллельной и последовательной обмоток генератора со смешанным возбуждением, можно добиться незначительного изменения напряжения машины с изменением ее нагрузки. Казалось бы, что мы, наконец, получили такой генератор, который может давать потребителю неизменное напряжение.

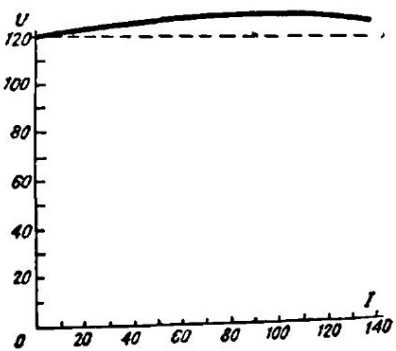
Однако с изменением тока нагрузкн будет нзменяться величина падения напряжения в проводах, идущих от генератора к потребнтелю. Поэтому даже при постоянном напряжении гене-



Фиг. 288. Схема генератора со смешанным возбуждением



Фиг. 289. Основной полюс машины со смешанным возбуждением



Фиг. 290. Внешняя характеристика генератора со смешанным возбуждением

ратора напряжение у потребителя будет меняться. Во избежание этого число витков последовательной обмотки генератора со смешанным возбуждением подбирают таким, чтобы магнитное поле, созданное этой обмоткой, не только компенсировало падение напряжения, вызванное действием реакции якоря и падением напряжения в обмотках машины, но было бы несколько большим. В этом случае напряжение генератора с нагрузкой будет немного увеличиваться, что даст возможность скомпенсировать падение напряжения в подводящих проводах. Поэтому напряжение у потребителя будет почти постоянным. Внешняя характеристика генератора со смешанным возбужденнем дана на фиг. 290.

§ 142. Параллельная работа генераторов с параллельным возбуждением

Для параллельной работы генераторов постоянного тока необходимо выполнить следующие условия:

1. Напряженне включаемого генератора должно быть равно напряжению сети или напряжению уже работающего генератора.

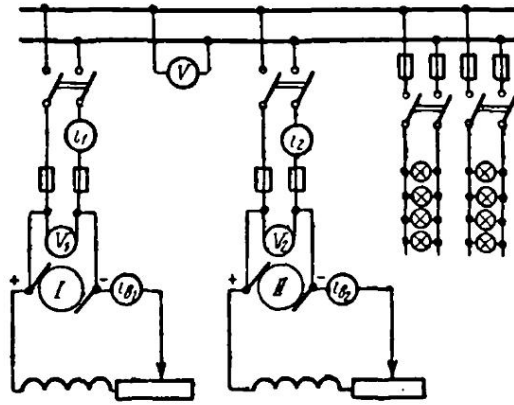
2. Полярность соединяемых зажимов включаемого генератора и сети должна быть одинаковой (плюс генератора должен быть соединен с плюсом сети и минус генератора — с минусом сети).

Первое условие параллельной работы генераторов — равенство напряжений — выполняется следующим образом. Пускается в ход первичный двигатель, приводящий во вращение включаемый генератор, и его скорость вращения доводится до номинальной. Изменяя сопротивленне регулировочного реостата генератора, устанавливают напряжение генератора равным напряжению сети или напряжению уже работающего генератора. Равенство напряжений проверяется по вольтметрам, подключенным к сети и генератору, или одним вольтметром с вольтметровым переключателем.

Второе условие параллельной работы — совпадение полярностей — проверяется только для генератора, впервые включаемого на параллельную работу. Зажимы генератора располагают так, чтобы при повторных включениях это условие было заранее выполнено. Проверку полярности можно производить или при помощи магнитоэлектрического вольтметра или при помощи ламп накаливания. Любая пара зажимов сети и генератора при выключенном рубильнике машины замыкается перемычкой. К зажимам другой пары подключается вольтметр, рассчитанный на двойное напряженне сети. Если плюс сети совпадает с плюсом генератора, а минус сети с минусом генератора, то вольтметр покажет нуль.

При неправильном включении вольтметр покажет двойное напряжение.

На фнг. 291 показана схема соединений для параллельной работы двух генераторов с параллельным возбуждением. Генератор, включенный параллельно в сеть или включенный с другим работающим генератором, тока не дает, так как э. д. с. генератора равна и противоположна напряжению сети. Чтобы генератор стал давать ток в сеть, нужно увеличить его э. д. с. при помощи регулировочного реостата.



Фиг. 291. Параллельная работа генератора с параллельным возбуждением

Ток, отдаваемый генератором в сеть, проходя по обмотке якоря генератора и взаимодействуя с магнитным потоком полюсов, создает момент сопротивления, противоположный моменту вращения первичного двигателя генератора. Поэтому с увеличением тока нагрузки механическая мощность первичного двигателя также должна увеличиваться.

Для перевода нагрузки с одного генератора на другой необходимо одновременно менять сопротивление регулировочных реостатов, увеличивая ток возбуждения генератора, который нужно нагрузить, и уменьшая ток возбуждения генератора, который нужно разгрузить.

Может случиться, что во время работы генератора э. д. с. его понизится (например, при уменьшении скорости первичного двигателя или при обрыве приводного ремня, приводящего генератор во вращение от первичного двигателя). В этом случае ток из сети пойдет в генератор и последний будет работать электрическим двигателем. Для предотвращения этого в цепи генератора устанавливают особые автоматы, которые выключают генератор, как только ток его изменит свое направление.

§ 143. Работа машины постоянного тока в качестве электрического двигателя

Если машину постоянного тока подключить к источнику напряжения, то она станет работать электрическим двигателем, т. е. превращать электрическую энергию в энергию механическую. Это свойство электрических машин работать как в качестве генератора, так и в качестве двигателя называется обратимостью.

Электрический двигатель был изобретен в 1834 г. русским академиком Б. С. Якоби.

Осенью 1838 г. Якоби применил свой электродвигатель для движения судов. Для питания двигателя была использована гальваническая батарея.

Якоби разработал тот тип коллектора машин постоянного тока, который в основных чертах применяется до настоящего времени.

Несмотря на то что существуют более простые по устройству и удобные в эксплуатации двигатели переменного тока, большое применение на практике имеют и двигатели постоянного тока. Основное преимущество этих двигателей — широкая регулировка скорости — дает возможность применять двигатели постоянного тока на электрифицированном транспорте, в грузоподъемных механизмах, горной технике, в различных схемах автоматического регулирования и управления и т. п.

В СССР изготовляются двигатели постоянного тока на широкий диапазон мощностей.

Тяговые двигатели трамвая имеют мощности от 33 до 54,5 *квт*, 550 *в*, 560—660 *об/мин*. Для магистральных электровозов применяются двигатели мощностью 320—450 *квт*, 750 *в* и 1500 *в*. Крановые двигатели изготовляются от 3 до 100 *квт*. Для привода прокатных станов устанавливаются двигатели постоянного тока мощностью в несколько тысяч киловатт.

Устройство электрических двигателей такое же, как генераторов. Принцип действия электрических двигателей постоянного тока основан на взаимодействии тока, протекающего в обмотке якоря, и магнитного поля, создаваемого полюсами электромагнитов. Поэтому для вращающего момента двигателя можно написать:

$$M_{вр} = cI_{я}\Phi,$$

где c — коэффициент пропорциональности, учитывающий постоянные величины для данного двигателя: число пар полюсов, число проводников обмотки якоря, число параллельных ветвей обмотки якоря;

$I_{я}$ — ток якоря;

Φ — магнитный поток.

При постоянной скорости вращения момент, развиваемый двигателем, равен моменту сопротивления механической нагрузки, приложенной к валу двигателя:

$$M_{вр} = M_{сопр}.$$

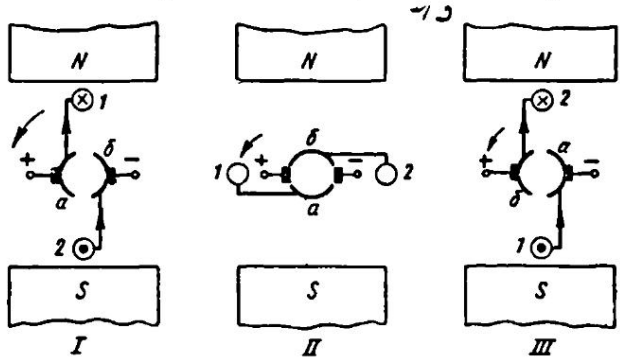
Мощность, потребляемая двигателем из сети, больше мощности на валу на величину потерь на трение в подшипниках, щеток о коллектор, якоря о воздух, потерь в стали на гистерезис и

вихревые токи, потерь мощности на нагрев обмоток двигателя и реостатов. К. п. д. электрического двигателя с нагрузкой меняется. При номинальной мощности величина к. п. д. двигателей колеблется от 70 до 93%, в зависимости от мощности, скорости вращения и исполнения двигателя.

Перемена направления вращения двигателя может быть произведена путем изменения направления тока либо в обмотке якоря, либо в обмотке полюсов. Двигатель, у которого одновременно изменено направление тока как в обмотке якоря, так и в обмотке полюсов, будет вращаться в ту же сторону, что и прежде. В зависимости от соединения обмотки якоря и обмотки возбуждения электрические двигатели постоянного тока делятся на двигатели с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

§ 144. Назначение коллектора у электродвигателей постоянного тока

Проводники обмотки якоря, по которым проходит ток, находясь в магнитном поле, созданном полюсами, испытывают силу, под действием которой они выталкиваются из магнитого поля. Для того чтобы якорь двигателя вращался в какую-либо опре-



Фиг. 292. Коллектор двигателя постоянного тока

деленную сторону, необходимо, чтобы направление тока в проводнике изменялось на обратное, как только проводник выйдет из зоны действия одного полюса, пересечет нейтральную линию и войдет в зону действия соседнего, разноименного полюса. Для изменения направления тока в проводниках обмотки якоря двигателя в момент, когда проводники проходят нейтральную линию, служит коллектор. Назначение коллектора поясняется на фиг. 292. Проводник, свернутый витком, помещен в магнитное поле. Концы витка припаяны к коллекторным пластинам *а* и *б*, к которым прижаты щетки, причем к левой щетке подключается

«плюс» сети, к правой — «минус» сети. В положении *I* ток сети попадает на коллекторную пластину *а*, от нее протекает по верхнему проводнику *1* витка, имея направление «от нас», возвращается по нижнему проводнику *2* витка, протекая «к нам» (заднее соединение рамки на схеме не показано), поступает на коллекторную пластину *б* и отсюда через щетку уходит в сеть. Применяя правило левой руки, находим, что виток будет стремиться повернуться в сторону, противоположную вращению стрелки часов. В положении *II* виток оказался на нейтральной линии. Коллекторные пластины не касаются щеток и поэтому тока в витке нет. Нейтральную линию виток проходит по инерции. Кроме того, остальные проводники якоря, не находящиеся в данный момент на нейтральной линии, продолжают создавать вращающий момент и помогут витку, лишенному тока, пройти нейтральное положение.

В положении *III* сторона витка *1* расположилась под другим полюсом, и направление тока в проводнике изменилось. То же самое случилось со стороной *2* витка. Сейчас под положительной щеткой оказалась коллекторная пластина *б*, под отрицательной щеткой — пластина *а*. Применяя правило левой руки, убеждаемся, что направление вращения витка остается прежним, т. е. против вращения стрелки часов.

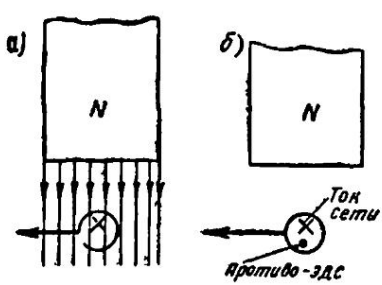
Следовательно, как только проводник в своем движении пересекает нейтральную линию, коллекторная пластина, соединенная с этим проводником, выходит из соприкосновения со щеткой, имеющей одну полярность, и подходит под щетку, обладающую другой полярностью.

§ 145. Противоэлектродвижущая сила якоря

При вращении якоря электродвигателя обмотка его пересекает магнитное поле. Поэтому в ней по закону электромагнитной индукции возникает индуктированная э. д. с.

Как видно из фиг. 293, направленне э. д. с., индуктируемой в проводнике, определяемое по правилу правой руки, будет противоположно напряжению сети, откуда она и получила название обратной электродвижущей силы, или противоэлектродвижущей силы. Отсюда ток в обмотке якоря двигателя при его работе будет:

$$I_я = \frac{U - E}{r_я},$$



Фиг. 293. Возникновение противоэлектродвижущей силы

где U — напряжение сети;
E — противо-э. д. с.;

$r_я$ — сопротивление обмотки якоря двигателя.

Величина противо-э. д. с. зависит от скорости вращения двигателя n и величины магнитного потока Ф:

$$E = cn\Phi,$$

где c — коэффициент пропорциональности, зависящий от числа пар полюсов, числа проводников и числа параллельных ветвей обмотки якоря.

Напряжение, приложенное к якорю двигателя, должно уравновешивать противо-э. д. с. и падение напряжения в обмотке якоря:

$$U = E + I_я r_я.$$

Но так как сопротивление обмотки якоря мало (десятые, сотые и даже тысячные доли ома), то падение напряжения также мало. Поэтому противо-э. д. с. почти равна напряжению сети.

Пример 1. Определить ток, потребляемый двигателем из сети, если напряжение сети 120 *в*, противо-э. д. с. 119,5 *в*, сопротивление обмотки якоря 0,01 *ом*.

$$I_я = \frac{U-E}{r_я} = \frac{120-119{,}5}{0{,}01} = 50\ а.$$

В момент пуска скорость вращения двигателя равна нулю. Поэтому противо-э. д. с. также равна нулю. Пусковой ток двигателя в этом случае равен напряжению сети, деленному на сопротивление якоря. Ток якоря достигает при этом величины, опасной для целости обмотки якоря и коллектора.

Во избежание этого на время пуска последовательно в цепь якоря двигателей постоянного тока включают определенное сопротивление, которое служит для ограничения пускового тока. Сопротивление выполняется в виде реостата, называемого пусковым реостатом. Благодаря большому удельному сопротивлению ($\rho = 0{,}4—0{,}5$) материалом для изготовления сопротивлений пусковых реостатов служат никелин (сплав меди, никеля и цинка) и константан (сплав меди, никеля и алюминия). Сопротивления выполняются в виде проволоки или ленты, намотанной или укрепленной на изолирующей раме или каркасе. Для реостатов на большой ток (крановые двигатели) применяются отлитые из чугуна сопротивления зигзагообразной формы, надетые на изолированные стальные стержни и стянутые гайками. При прохождении тока по сопротивлениям реостата последние нагреваются, выделяя тепло. Охлаждение реостатов бывает воздушное и масляное. Реостаты с воздушным охлаждением покрыты металлическим кожухом с отверстиями, через которые уходит нагретый воздух, уступая место холодному воздуху. Сопротивления реостатов с масляным охлаждением погружаются в бак с маслом, обладающим большей теплопроводностью, чем воздух, вследствие чего масляные реостаты получаются компактнее воздушных реостатов.

По мере того как скорость вращения двигателя будет увеличиваться, в обмотке якоря возникнет противо-э. д. с. и ток якоря станет быстро уменьшаться. В этом случае сопротивление пускового реостата будет не только бесполезно, но и вредно, так как, уменьшая ток, оно уменьшает вращающий момент и не дает скорости двигателя быстро возрастать. Поэтому в начале пуска сопротивление пускового реостата должно быть полностью введено. По мере увеличения скорости вращения двигателя сопротивления реостата необходимо плавно выводить и в конце пуска сопротивление должно быть полностью выведено. Следует помнить, что пусковой реостат рассчитан на кратковременное (на время пуска) протекание тока. Поэтому, если в конце пуска пусковой реостат не будет выведен целиком, оставшаяся часть сопротивления может сгореть.

Для быстрейшего увеличения противо-э. д. с. в пусковой период необходимо следить за тем, чтобы двигатель получил полное возбуждение, т. е. чтобы в цепи возбуждения не было включено какое-либо сопротивление и во всяком случае не допускать обрыва или выключения обмотки возбуждения. Пусковой реостат выбирают с таким расчетом, чтобы он уменьшал пусковой ток двигателя не до величины номинального тока, а до величины в 2—2,5 раза большей. Этим добиваются, с одной стороны, экономии в материалах и стоимости реостата и, с другой, того, что бо́льший ток при пуске дает возможность двигателю быстро развить нормальную скорость вращения.

Пример 2. Подсчитать сопротивление пускового реостата для электродвигателя, номинальный ток которого 20 *а*, сопротивление обмотки якоря 0,02 *ом*. Напряжение сети 220 *в*.

Выбираем пусковой ток, в 2 раза больший номинального тока, т. е. $20 \times 2 = 40$ *а*, и подсчитываем сопротивление цепи якоря:

$$r = \frac{U}{I_{пуск}} = \frac{220}{40} = 5{,}2 \text{ ом}.$$

Но так как в цепь якоря входит и сопротивление обмотки якоря — 0,02 *ом*, то сопротивление одного пускового реостата будет:

$$5{,}2 - 0{,}02 = 5{,}18 \text{ ом}.$$

Равенство момента вращения двигателя и момента сопротивления механической нагрузки, существующее при постоянной скорости вращения якоря, временно нарушается, если нагрузка на валу двигателя будет меняться. Так, например, при увеличении момента сопротивления он будет больше момента вращения и скорость вращения двигателя будет уменьшаться. Это вызовет уменьшение противо-э. д. с. (зависящей от скорости) и увеличение тока двигателя. Уменьшение скорости вращения будет продолжаться до тех пор, пока увеличившийся ток якоря не создаст новый, увеличенный момент вращения, равный возросшему моменту сопротивления. В дальнейшем двигатель бу-

дет работать с меньшей, но постоянной скоростью. Наоборот, при разгрузке двигателя момент вращения его будет больше момента сопротивления, якорь станет вращаться быстрее, противо-э. д. с. увеличится и уменьшившийся ток двигателя будет создавать меньший момент вращения.

§ 146. Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока

Выше было установлено, что величина противо-э. д. с. зависит от скорости вращения и величины магнитного потока двигателя. Эта зависимость выражается формулой

$$E = cn\Phi,$$

откуда

$$n = \frac{E}{c\Phi} = \frac{U - I_я r_я}{c\Phi}.$$

Так как $I_я r_я$ очень мало (вследствие малого $r_я$), то приблизительно можно написать:

$$n = \frac{U}{c\Phi}.$$

Из последнего выражения видно, что скорость вращения двигателя постоянного тока пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна магнитному потоку.

Изменяя напряжение, подводимое к двигателю, а также изменяя ток возбуждения двигателя при помощи регулировочного реостата, включенного в цепь возбуждения, можно изменять скорость вращения двигателя.

§ 147. Реакция якоря двигателей постоянного тока

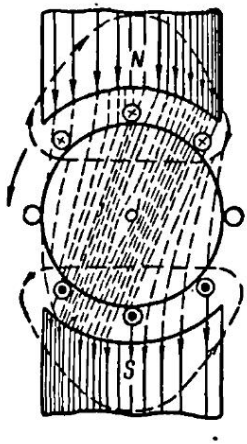
При работе электродвигателя магнитное поле якоря действует на магнитное поле полюсов. Следовательно, у двигателей, так же как и у генераторов, наблюдается реакция якоря (фиг. 294). При одном и том же направлении тока в обмотке якоря и той же полярности полюсов направление вращения двигателя обратно направлению вращения генератора. Поэтому реакция якоря у двигателей сопровождается:

1. Размагничиванием сбегающего края и намагничиванием набегающего края полюса. При насыщении магнитной системы результирующий магнитный поток уменьшается, отчего скорость двигателя несколько увеличивается.

2. Ось результирующего магнитного поля сдвигается относительно оси полюсов. Физическая нейтраль смещается в сторону, противоположную вращению двигателя на угол, величина которого зависит от нагрузки двигателя.

3. Щетки, устанавливаемые на физической нейтрали, также должны быть передвинуты по коллектору в сторону, обратную вращению двигателя, в новое положение нейтрали.

При переходе витка обмотки через физическую нейтраль направление тока в витке с помощью коллектора меняется на обратное. В это же самое время коммутируемый виток якорной обмотки замыкается щетками накоротко. Изменение тока в витке вызывает э. д. с. самоиндукции, стремящуюся задержать изменение тока. Как было указано выше (§ 136), компенсация э. д. с. самоиндукции возможна двумя способами: сдвигом щеток и без сдвига щеток, при помощи дополнительных полюсов. В генераторах щетки приходилось сдвигать по направлению вращения якоря и помещать коммутируемый виток в поле другой полярности. Уменьшение тока в витке генератора, когда виток приближается к зоне коммутации, вызывает э. д. с. самоиндукции, направленную в этот момент по направлению тока или индуктированной э. д. с. той параллельной ветви, в которую входит данный виток. Для уравновешивания э. д. с. самоиндукции необходимо при помощи внешнего магнитного поля создать в коммутируемом витке э. д. с., направленную против э. д. с. самоиндукции (или против индуктируемой э. д. с. той параллельной ветви, в которую входит данный виток). Выше мы видели, что ток в обмотке якоря при работе двигателя находят по формуле



Фиг. 294. Реакция якоря в электродвигателях постоянного тока

$$I = \frac{U - E}{r_я}.$$

Из формулы видно, что направление тока якоря определяется напряжением сети и обратно направлению индуктированной противо-э. д. с. В витке двигателя, пересекающем физическую нейтраль, ток меняет свое направление на обратное. При уменьшении тока в витке возникающая э. д. с. самоиндукции стремится препятствовать изменению тока и направлена в этот момент в сторону протекания тока или обратно противо-э. д. с. Для уравновешивания э. д. с. самоиндукции в коммутируемом витке двигателя при помощи внешнего магнитного поля должна быть индуктирована э. д. с., имеющая направление, обратное э. д. с. самоиндукции или обратное направлению тока, а следовательно, согласное с направлением противо-э. д. с. Поэтому для улучшения условий коммутации щетки двигателей постоянного тока сдвигают против вращения якоря. Для создания безыскровой коммутации и борьбы с реакцией якоря у двигателей применяют

те же меры, что и у генераторов постоянного тока, т. е. дополнительные полюса и компенсационную обмотку. В отличие от генераторов у двигателей чередование главных и дополнительных полюсов следующее: за главным полюсом двигателя в сторону вращения якоря следует одноименный дополнительный полюс.

Для двигателей большой мощности с тяжелыми условиями работы, как, например, в подъемных и крановых установках, для шахтных и тяговых двигателей, станков, прокатных станов и т. п. иногда применяют компенсационную обмотку.

§ 148. Электродвигатель с параллельным возбуждением

На фиг. 295 представлена схема двигателя с параллельным возбуждением и включенным в цепь якоря пусковым реостатом. Так как обмотка возбуждения включена параллельно в сеть, то при постоянном сопротивлении цепи возбуждения и напряжении сети магнитный поток Ф двигателя должен быть постоянным. Выше было указано, что, пренебрегая падением напряжения в обмотке якоря, получим, что скорость двигателя постоянного тока будет зависеть только от величин напряжения сети и магнитного потока. Если же они постоянны, то и скорость двигателя с параллельным возбуждением не должна изменяться с изменением нагрузки. Однако из формулы

$$n = \frac{E}{c\Phi} = \frac{U - I_я r_я}{c\Phi}$$

видно, что величина противо-э. д. с. двигателя уменьшается с увеличением тока якоря, отчего скорость двигателя также уменьшается. Кроме того, с увеличением нагрузки двигателя реакция якоря ослабляет магнитный поток, что приводит к некоторому увеличению скорости. На практике падение напряжения в обмотке якоря подбирают таким, чтобы его влияние на скорость двигателя было почти компенсировано реакцией якоря.

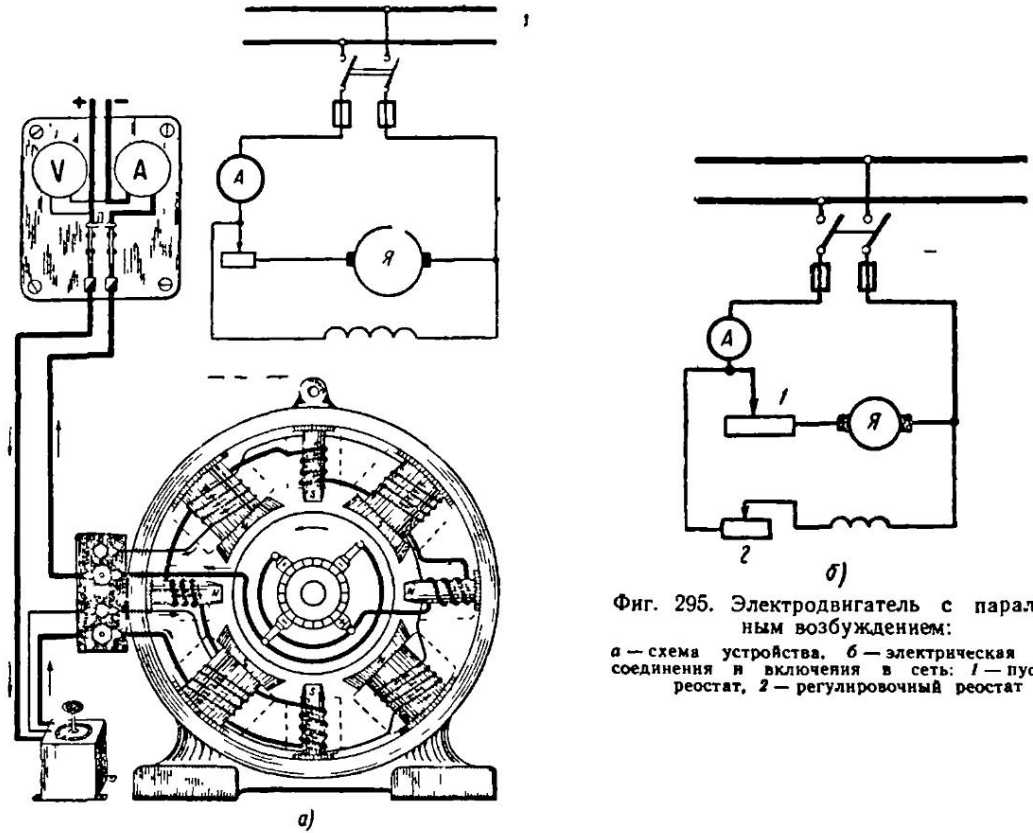
Отсюда характерным свойством двигателя с параллельным возбуждением является почти постоянная скорость вращения при изменении нагрузки на его валу. Обычно скорости у двигателей этого типа при достижении полной нагрузки уменьшаются на 3—5%.

Вращающий момент двигателя пропорционален произведению тока якоря на величину магнитного потока:

$$M_{вр} = cI_я\Phi.$$

Пренебрегая небольшим изменением магнитного потока вследствие реакции якоря, заключаем, что момент вращения двигателя с параллельным возбуждением пропорционален току якоря:

$$M_{вр} = c_1 I_я,$$



Фиг. 295. Электродвигатель с параллельным возбуждением:

а — схема устройства, *б* — электрическая схема соединения и включения в сеть: *1* — пусковой реостат, *2* — регулировочный реостат

Следовательно, по амперметру, включенному в цепь якоря, можно судить о нагрузке двигателя.

Наибольшая скорость вращения будет у двигателя при холостом ходе, если при этом сопротивление регулировочного реостата полностью введено. Размыкание цепи возбуждения вызовет уменьшение магнитного потока двигателя до незначительной величины потока остаточного магнетизма. Так как противо-э. д. с. должна быть почти равна напряжению сети, то с уменьшением магнитного потока скорость вращения двигателя резко возрастет и станет опасной для механической прочности двигателя. Поэтому при эксплуатации двигателя необходимо следить за исправным состоянием цепи возбуждения.

Регулирование скорости вращения двигателя с параллельным возбуждением обычно производится путем изменения магнитного потока, с помощью регулировочного реостата в цепи возбуждения. Регулирование скорости у некоторых двигателей лежит в пределах 1 : 3. Изменение направления вращения двигателей с параллельным возбуждением производится изменением направления тока в обмотке возбуждения полюсов или изменением направления тока в обмотке якоря. Обычно перемена вращения осуществляется вторым способом, так как всякие операции с обмоткой возбуждения опасны для обслуживающего персонала и нежелательны ввиду появления э. д. с. самоиндукции, могущей вызвать пробой изоляции обмотки и обгорание контактов.

Двигатели с параллельным возбуждением применяются в сетях постоянного тока для привода станков, механизмов (подвесные электрические дороги, насосы, вентиляторы, ткацкие машины, прокатные станы, шахтные подъемники), требующих постоянной скорости вращения или широкой регулировки скорости.

§ 149. Электродвигатель с последовательным возбуждением

Схема двигателя с последовательным возбуждением показана на фиг. 296. У двигателей этого типа обмотки якоря и возбуждения соединены последовательно. Поэтому ток, протекающий по обеим обмоткам двигателя, будет одинаков.

Так как при малых насыщениях стали магнитопровода двигателя магнитный поток пропорционален току якоря:

$$\Phi = c_1 I_я,$$

то вращающий момент двигателя

$$M_{вр} = c I_я \Phi \quad .$$

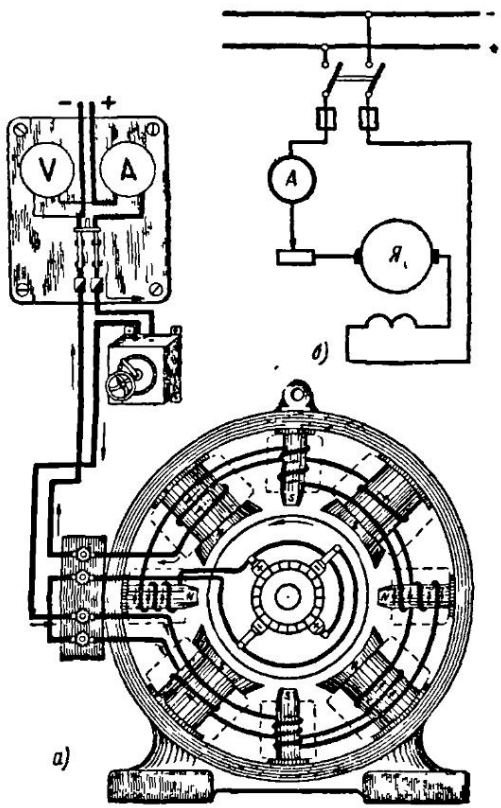
можно считать пропорциональным квадрату тока якоря

$$M_{вр} = c_2 I^2_я.$$

Квадратичная зависимость момента вращения от тока в обмотке якоря позволяет двигателю с последовательным возбуж-

дением резко увеличивать с нагрузкой свой момент вращения. Это особенно ценно при пуске двигателя в ход, когда он должен быстро преодолеть инерцию нагрузки на его валу.

У двигателя с параллельным возбуждением момент вращения пропорционален первой степени тока. Поэтому при одинаковом пусковом токе и при прочих равных условиях двигатель с последовательным возбуждением разовьет больший вращающий момент, чем двигатель с параллельным возбуждением.



Фиг. 296. Электродвигатель с последовательным возбуждением:
а — схема устройства, *б* — электрическая схема соединения и включения в сеть

Скорость вращения двигателя с последовательным возбуждением с нагрузкой резко меняется, так как вместе с изменением тока якоря меняется магнитный поток полюсов. Из формулы

$$n = \frac{U - I_я r_я}{c\Phi}$$

видно, что при постоянном напряжении сети скорость вращения двигателя обратно пропорциональна величине магнитного потока. Поэтому нагруженный двигатель, потребляющий из сети большой ток, имеет значительный магнитный поток и небольшую скорость. При уменьшении нагрузки на валу ток якоря уменьшается, магнитный поток также уменьшается и скорость вращения двигателя увеличивается.

Поэтому, если нагрузку на валу двигателя с последовательным возбуждением сильно уменьшить или снять полностью, ток якоря и поток Ф снльно уменьшатся и, как внднo из последней формулы, скорость вращения двигателя возрастает до недопустимо большой величины, опасной для механической прочности двигателя. Поэтому работа двигателя с последовательным воз-

буждением вхолостую или при малой нагрузке недопустима, так как ему грозит «разнос» от чрезмерного повышения скорости вращения. Двигатели этого типа нельзя соединять с механизмом при помощи ремня, так как обрыв или соскакивание ремня приведет к разгрузке и «разносу» двигателя.

Регулировка скорости вращения двигателя с последовательным возбуждением производится или путем изменения напряжения, питающего двигатель, или измененнем магнитного потока полюсов. Для регулировки скорости вращения по первому способу в цепь двигателя включают особый регулировочный реостат (помимо пускового) или устанавливают один реостат, который мог бы служнть как пусковым, так и регулнровочным. Этот способ регулировки неэкономнчен, так как в реостатах теряется много энергии на тепло. Регулировку магнитного потока полюсов, а вместе с этим и регулировку скорости двигателя можно производить при помощи реостата, включенного параллельно обмотке возбуждения двигателя. Меняя сопротивление реостата, можно менять ток, ответвляющнйся в обмотку возбуждения. Иногда обмотку возбуждения двигателя разбивают на несколько секций и, соединяя их последовательно или параллельно, меняют магнитный поток двигателя. Для этой же цели схемы некоторых двигателей позволяют выключать часть витков обмотки возбуждення. При совместной работе нескольких двнгателей с последовательным возбуждением для регулирования скорости применяется последовательное или параллельное соединение двигателей друг с другом.

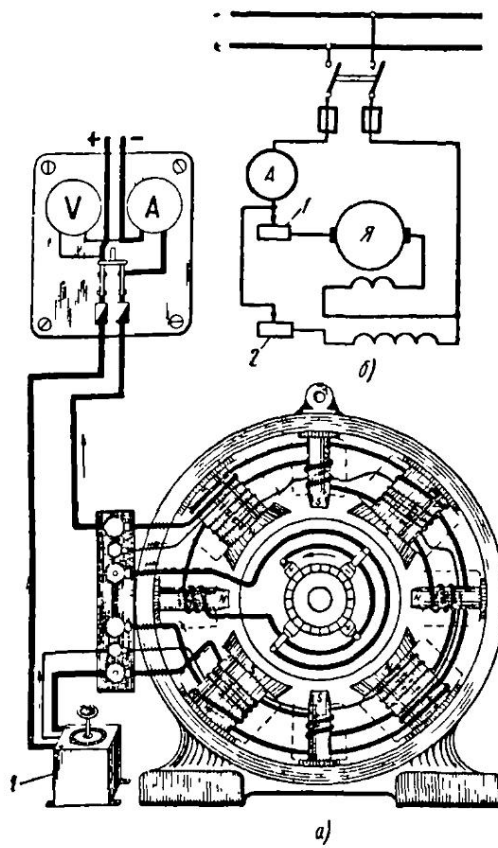
Двигатели с последовательным возбуждением применяются в качестве тяговых двигателей электровозов, поездов метрополитена, трамвая, электрических подъемных кранов и т. п.

§ 150. Электродвигатель со смешанным возбуждением

Схема двигателя со смешаниым возбуждением дана на фиг. 297. Наличие на полюсах двигателя двух обмоток позволяет использовать преимущества двнгателей параллельного и последовательного возбуждения. Этими преимуществами являются постоянство скорости и большой вращающий момент при пуске двигателя.

Благодаря присутствию параллельной обмотки двигатель со смешанным возбуждением не может пойти в «разнос» при малой нагрузке или отсутствии ее. Обмотки возбуждения могут быть включены так, чтобы их магнитные потоки совпадали по направлению (согласиое включение), или так, чтобы потоки были противоположны (встречное включение). При согласном включении обмоток двигатель будет приближаться по свойствам к двигателю с параллельным или последовательным возбуждением, в зависимости от того какая из обмоток будет иметь большую намагничивающую силу. При нагрузке двигателя со встречным

включеннем обмоток магнитный поток последовательной обмотки, увеличиваясь, уменьшает общий магнитный поток двигателя, а скорость двигателя увеличивается.



Фиг. 297. Электродвигатель со смешанным возбуждением:
а — схема устройства, *б* — электрическая схема соединения и аключения в сеть: *1* — пусковой реостат, *2* — регулировочный реостат

Регулировка скорости двигателя со смешанным возбуждением выполняется регулировочным реостатом, включенным в цепь параллельной обмотки возбуждения.

§ 151. Вращающиеся преобразователи

Для преобразования переменного тока в постоянный и обратно — постоянного тока в переменный могут служить вращающиеся преобразователи.

Различают следующие типы преобразователей:

1) двигатель-генераторы;

2) одноякорные преобразователи;

3) каскадные преобразователи.

Кроме того, для преобразования (выпрямления) переменного тока в постоянный применяются выпрямители, которые рассматриваются в главе тринадцатой.

Двигатель-генератор (фиг. 298) состоит из двух отдельных машин — двигателя и генератора, связанных между собой ременной передачей, или сидящих на одном валу и соединенных муфтой. Если двигатель-генератор служит для преобразования переменного тока в постояниый, то в качестве двигателя используют асинхронный или синхронный двигатели, а генератором служит генератор постоянного тока с независимым возбуждением или самовозбуждением.

Вычислим общий к. п. д. установки:

обозначим через P_1 — мощность, потребляемую двигателем из сети, P_2 — мощность на валу двигателя. Тогда к. п. д. двигателя

$$\eta_д = \frac{P_2}{P_1},$$

откуда

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_д};$$

обозначим через P_3 — мощность, получаемую генератором, и P_4 — мощность, отдаваемую генератором. Тогда к. п. д. генератора

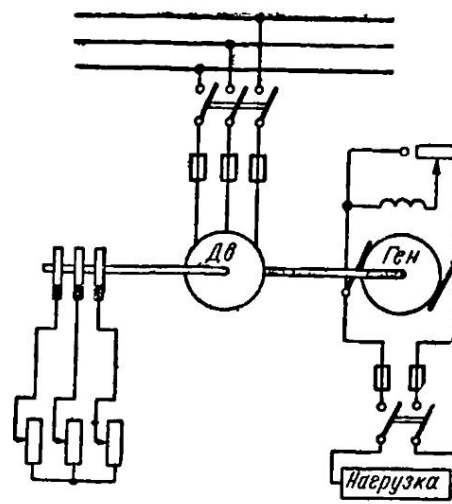
$$\eta_г = \frac{P_4}{P_3},$$

откуда

$$P_4 = \eta_г P_3.$$

Общий к. п. д. установки

$$\eta = \frac{P_4}{P_1} = \frac{\eta_г P_3 \eta_д}{P_2}.$$



Фиг. 298. Схема двигатель-генератора

Если машины расположены на одном валу, то можно считать $P_2 = P_3$; поэтому окончательно:

$$\eta = \eta_д \eta_г.$$

В том случае, если обе машины связаны ременной или какой-либо другой передачей, то к. п. д. передачи $\eta_п = \frac{P_3}{P_2}$ и общий к. п. д. равны произведению коэффициентов полезного действия двигателя, передачи и генератора:

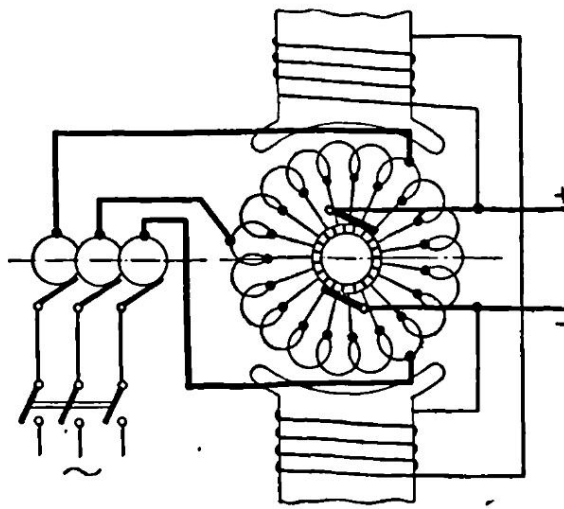
$$\eta = \eta_д \eta_п \eta_г.$$

У двигатель-генератора напряжение постоянного тока не зависит от напряжения переменного тока.

Одноякорный преобразователь представляет собой генератор постоянного тока, у которого, кроме коллектора, имеются также контактные кольца. Как показывает само название преобразователя, преобразование одного рода тока в другой происходит в одном якоре. Поэтому между напряжениями переменного и постоянного тока существует определенная зависимость. На

фиг. 299 дана схема одноякорного преобразователя для преобразования трехфазного переменного тока в постоянный ток. Обмотка якоря с одной стороны машины соединена с коллектором. Три точки обмотки якоря, расположенные под углом 120° (для двухполюсной машины), присоединены к трем контактным кольцам, укрепленным на валу с другой стороны машины.

Для преобразования однофазного переменного тока в постоянный ток служат преобразователи, у которых на валу, кроме коллектора, расположены два контактных кольца, присоединенные к двум диаметрально противоположным точкам обмотки якоря.



Фиг. 299. Схема одноякорного преобразователя

Одноякорные преобразователи для преобразования шестифазного переменного тока в постоянный ток имеют шесть контактных колец. Возбуждение одноякорного преобразователя происходит со стороны постоянного тока. Магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения полюсов, является общим для электродвижущих сил постоянного и переменного токов, индуктируемых в якоре преобразователя. Выше было отмечено, что между напряжениями переменного и постоянного токов в преобразователе существует определенная зависимость.

Не вдаваясь в математические расчеты, приведем некоторые цифры:

$U_{пер} = 0{,}72\ U_{пост}$ при однофазном токе;
$U_{пер} = 0{,}62\ U_{пост}$ при трехфазном токе;
$U_{пер} = 0{,}354\ U_{пост}$ при шестифазном токе.

Из приведенных данных видно, что напряжение постоянного тока всегда больше напряжения переменного тока.

Расчеты показывают, что наиболее экономичными являются шестифазные преобразователи, которые при том же весе развивают бо́льшую мощность, чем преобразователи трехфазного и однофазного тока.

Пуск преобразователя можно осуществить тремя способами:

1) со стороны постоянного тока;

2) со стороны переменного тока;

3) с помощью пускового двигателя.

Пуск преобразователя со стороны постоянного тока возможен при наличии постороннего источника постоянного тока. Преобразователь пускают в ход как двигатель постоянного тока. Со стороны переменного тока преобразователь синхронизируют с сетью и включают рубильник сети. Затем отключают пусковой источник постоянного тока и подключают к преобразователю нагрузку.

Пуск со стороны переменного тока происходит путем замыкания рубильника трехфазного тока. Обмотка якоря создает вращающееся магнитное поле, которое, пересекая короткозамкнутую обмотку, заложенную в полюсных наконечниках, индуктирует в ней ток. В результате взаимодействия индуктированных токов и вращающегося магнитного поля якорь преобразователя начинает вращаться. Магнитный поток полюсов возникает по тому же принципу, как у генераторов с самовозбуждением. Преобразователь, пущенный в ход, как асинхронный двигатель при наличии постоянного магнитного потока втягивается в синхронизм и работает синхронным двигателем.

Пуск преобразователя при помощи пускового двигателя особого пояснения не требует.

Каскадный преобразователь состоит из асинхронного двигателя и одноякорного преобразователя. Обе машины установлены на одном валу. Цепь ротора асинхронного двигателя соединяется последовательно, или, как говорят, в каскад с якорем преобразователя.

Каскадный преобразователь со стороны переменного тока работает в режиме синхронного двигателя и преобразует мощность скольжения, получаемую от ротора асинхронного двигателя, в мощность постоянного тока.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные части машины постоянного тока и укажите их назначение.
2. Каково устройство и назначение коллектора у генераторов постоянного тока?
3. Какие бывают типы обмоток якоря?
4. Что такое реакция якоря? Какие изменения происходят в генераторе (двигателе) во время работы под влиянием реакции якоря?
5. Что такое коммутация, каковы условия идеальной коммутации?

6. Какие меры борьбы с реакцией якоря?

7. Какие меры применяют для улучшения условий коммутации у машин постоянного тока?

8. Как устроен генератор с независимым возбуждением? Указать его свойства, преимущества, недостатки.

9. То же, но генератор с параллельным возбуждением.

10. То же, но генератор с последовательным возбуждением.

11. То же, но генератор со смешанным возбуждением.

12. Как включить генератор с параллельным возбуждением на параллельную работу?

13. Почему нельзя включить двигатель постоянного тока в сеть без пускового реостата?

14. Как можно регулировать скорость вращения двигателя постоянного тока?

15. Как устроен двигатель с параллельным возбуждением? Указать его свойства, преимущества, недостатки.

16. То же, но двигатель с последовательным возбужденнем.

17. То же, но двигатель со смешанным возбуждением.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ВЫПРЯМИТЕЛИ

§ 152. Общие сведения о выпрямителях

В технике имеется много областей, для которых необходим постоянный ток. Гальванопластика, гальваностегия, рафинирование металлов, зарядка аккумуляторов, электрифицированный транспорт, получение магнитных полей — вот неполный перечень областей, где этот ток нашел себе исключительное применение.

Постоянный ток можно получать от генераторов постоянного тока, аккумуляторов и гальванических элементов. Чаще же всего к месту потребления подается переменный ток, который получается от генераторов переменного тока, установленных на электростанции. Этот переменный ток затем преобразуют в постоянный ток.

Раньше для преобразования переменного тока в постоянный применялись двигатель-генераторы, представляющие собой электродвигатель переменного тока, соединенный с генератором постоянного тока. Электродвигатель питается от сети переменного тока и вращает генератор. Последний вырабатывает постоянный ток. Теперь двигатель-генераторы применяются редко, и обычно пользуются специальными устройствами, преобразующими переменный ток в постоянный и называемыми выпрямителями.

В технике наибольшее применение получили два типа выпрямителей: 1) твердые выпрямители и 2) ртутные выпрямители. Эти два типа выпрямителей ниже будут рассмотрены подробнее.

Твердыми выпрямителями называются такие, у которых отдельные части изготовлены из твердых тел. Из твердых выпрямителей распространение в технике получили медноокисные (купроксные), селеновые, кремниевые и германиевые.

Ртутные выпрямители бывают: а) стеклянные и б) металлические.

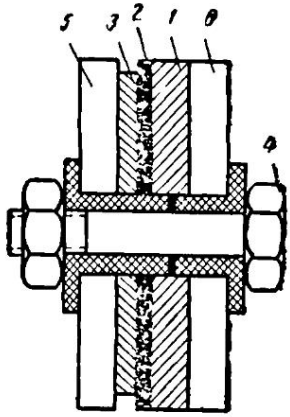
Кроме твердых и ртутных выпрямителей существуют еще выпрямители: механические, кенотроны, газотроны, электролитические. Кенотроны (ламповые выпрямители) широко применяются в радиотехнике, имеются в большинстве современных радио-

приемников, питаемых от сетей переменного тока, в рентгеновских аппаратах и т. д. Газотроны употребляются в высокочастотных закалочных установках и т. д.

§ 153. Меднозакисные (купроксные) выпрямители

Устройство одного элемента меднозакисного выпрямителя показано на фиг. 300. Медная круглая шайба *1* представляет собой один электрод. На шайбе имеется слой закиси меди *2*.

Для получения на медной шайбе слоя закиси меди (Cu_2O) шайбу нагревают до высокой температуры и затем быстро охлаждают в холодной воде.



Фиг. 300. Устройство одного элемента меднозакисного выпрямителя

Если к поверхности слоя закиси меди прижать какую-либо металлическую пластину *3*, то это и будет второй электрод. Обычно для второго электрода берут свинцовую пластину как обеспечивающую хороший контакт при соприкосновении вследствие пластичности свинца.

На границе между проводником (медью) и полупроводником (закисью меди) возникает тонкий слой толщиной порядка стотысячных долей миллиметра, обладающий большим сопротивлением. Этот слой называют запирающим слоем.

Таким образом, выпрямитель состоит из трех слоев: первый слой — металл, обладающий свободными электронами в большой концентрации; второй слой — изоляционный (запирающий), не имеющий свободных электронов, и третий слой — полупроводник, имеющий малое количество свободных электронов. При наличии на крайних слоях разности потенциалов в запирающем слое возникает сильное электрическое поле, которое способствует вырыванию свободных электронов из прилегающих к нему слоев. Если сообщить меди отрицательный, а закиси меди положительный потенциал, то количество свободных электронов, вырванных из меди, будет велико и в цепи станет проходить электрический ток по направлению от закиси меди к меди. При обратной полярности количество электронов, вырванных из слоя закиси меди, будет очень мало и ток в цепи практически проходить не будет.

Односторонняя проводимость системы закись меди — медь может быть использована для выпрямления переменного электрического тока.

При сборке выпрямителя отдельные элементы надевают на изолированный болт *4* и зажимают между латунными шайбами *5* и *6*.

К одному элементу выпрямителя может быть приложено напряжение не более 4—8 *в*. При большем напряжении пластины соединяют последовательно. Наибольшая плотность тока меднозакисных выпрямителей 0,1—0,15 *а/см*^{2} при допустимом напряжении до 8 *в* на выпрямляющий слой. При больших токах увеличивают размеры пластин или соединяют их параллельно.

Для отвода тепла между отдельными шайбами помещают так называемые радиаторы в виде металлических шайб большого диаметра.

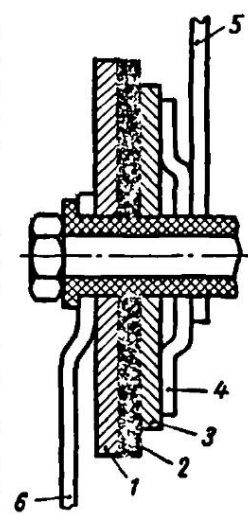
Срок службы меднозакисных выпрямителей 12—15 лет, к. п. д. около 70%.

Меднозакисные выпрямители применяются для питания цепей железнодорожной сигнализации, в радиотехнике, для зарядки аккумуляторов, для питания электроизмерительных приборов детекторной системы, позволяющей магнитоэлектрическими приборами измерять переменные токи и напряжения и т. д.

§ 154. Селеновые выпрямители

Селен — химический элемент (Se), встречающийся в природе в свободном состоянии в залежах серы. В промышленности селен получается из отходов сернокислотного производства, а также из осадков (шлама) при электролитической очистке меди. В обычном состоянии селен — твердое вещество серого цвета с температурой плавления 220° и удельным весом 4,8. Селен обладает способностью менять свою проводимость в зависимости от его освещенности. На этом основано применение его в фотоэлементах.

На фиг. 301 представлен элемент селенового выпрямителя. Здесь одним электродом является железная никелированная шайба *1* с нанесенным на ней тонким слоем селена *2*. Вторым электродом служит слой *3* из специального, хорошо проводящего сплава висмута, олова и кадмия (Bi, Sn, Cd), напыленного на селен. К этому так называемому покровному слою прижата контактная латунная шайба *4*. Для включения элемента в цепь служат пластинки *5* и *6*, касающиеся обоих электродов. На границе между покровным слоем и слоем селена возникает запирающий слой, назначение которого дано в описании меднозакисных выпрямителей.



Фиг. 301. Устройство одного элемента селенового выпрямителя

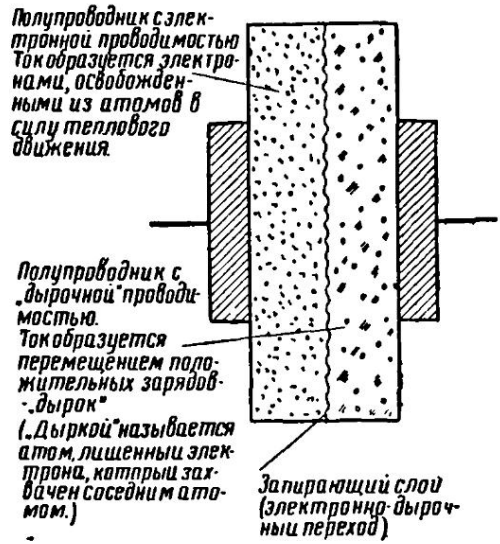
Допустимая плотность тока селенового выпрямителя 0,2—0,3 *а/см*². Напряжение на элемент не должно быть выше 16—18 *в* (в зависимости от диаметра шайб), к. п. д. около 80%.

Селеновые выпрямители применяются для тех же целей, что и медиозакисные выпрямители, за исключением детекторных электроизмерительных приборов, где они не применяются из-за непостоянства характеристик.

§ 155. Германиевый полупроводниковый выпрямитель

В послевоенные годы большое практическое значение приобрели выпрямители из германия и кремния.

Кремниевые и германиевые выпрямители (диоды — детекторы) не расходуют энергию на накал нити, необходимый в электронных лампах, нечувствительны к сотрясениям, просты в из-

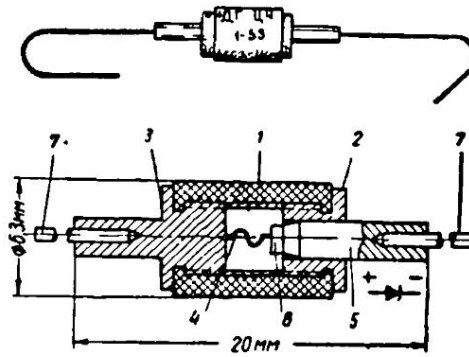


Фиг. 302. Принцип действия германиевого (кремниевого) выпрямителя

готовлении, имеют небольшие размеры (несколько миллиметров), имеют большой срок службы, надежны в работе. Если к. п. д. меднозакисных выпрямителей не превышает 70—75%, а селеновых около 80%, то к. п. д. германиевых выпрямителей превышает 95%, а плотность тока у них во много раз больше, чем у меднозакисных и селеновых выпрямителей. Германиевые и кремниевые приборы применяются не только для выпрямления, но и для усиления радиоколебаний (в усилите-

лях, в генераторах). В германиевом или кремниевом выпрямителях применяются полупроводники с электронной и так называемой «дырочной» проводимостью.

Как было указано выше, принадлежность проводника и полупроводника к тому или иному типу проводимости определяется прежде всего примесями, которые почти всегда имеются в них. Если примеси легко отдают электроны, то материал принадлежит к числу проводников или полупроводников с электронной проводимостью. Если же примеси поглощают электроны, то материал имеет «дырочную» проводимость. На границе между соприкасающимися полупроводниками различных типов (электронного и дырочного) образуется запирающий слой, который пропускает ток только в одном направлении (фиг. 302). На этом свойстве полупроводников основано действие выпрямителей. Простые и компактные полупроводниковые выпрямители с успехом заменяют сложные ртутные выпрямители, двигатель-генераторы и выпрямительные электронные лампы, применяемые для преобразования переменного тока в постоянный. Наиболее пригодными для устройства выпрямителей являются германий и кремний. Тип их проводимости зависит от примесей (например, индия). Германий — химический элемент, символ Ge, порядковый номер 32, атомный вес 72,6, хрупкий металл, серовато-белого цвета, близкий по свойствам к олову, удельный вес 5,4, температура плавления 959°. Кремний — химический элемент, символ Si, порядковый номер 14, атомный вес 28,06, металлоид, одна из главных составных частей земной коры, камней, песка, стекла и т. д., удельный вес 2,6—2,7, температура плавления 1450°. Индий — редкий химический элемент, символ In, порядковый номер 49, атомный вес 114,76, мягкий белый металл, удельный вес 7,3, температура плавления около 1500°.



Фиг. 303. Устройство германиевого выпрямителя и его внешний вид:

1 — керамический патрон, *2*, *3* — нижний и верхний штырьки детектора, *4* — контактная пружина, *5* — кристаллодержатель, *6* — германиевая пластинка, *7* — проволочные выводы

На фиг. 303 показан внешний вид и разрез германиевого полупроводникового выпрямителя (диода), применяемого в радиотехнике для выпрямления токов высокой частоты.

Выпрямление тока происходит в точке соприкосновения контактной пружины (электронная проводимость) с германиевой

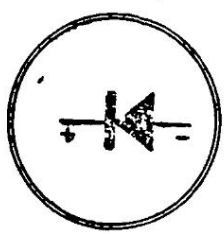
пластиной («дырочная» проводимость). Малая собственная емкость и небольшие размеры такого выпрямителя позволили использовать его в радиотехнике. Но токи, выпрямленные точечными электродами, невелики. Мощные выпрямители изготовляются с большими поверхностями.

§ 156. Схемы включения твердых выпрямителей

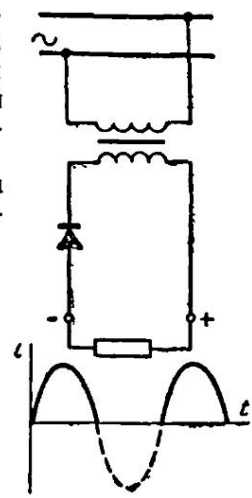
Обозначение выпрямителей на электрнческих схемах показано на фиг. 304, прнчем острие стрелки показывает путь тока.

Для выпрямлення однофазного переменного тока в ток постоянный можно нспользовать схему, показанную на фиг. 305. Нижняя часть синусоиды переменного тока выпрямителем срезается, и в цепи после выпрямителя протекает пульснрующий ток с перерывом в полпериода.

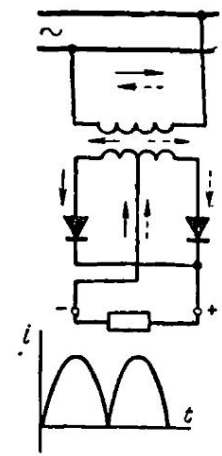
Это — так называемая схема однополупериодного выпрямления.



Фиг. 304. Условное обозначение выпрямнтелей на электрических схемах



Фиг. 305. Схема однополупериодиого выпрямления одиофазного переменного тока

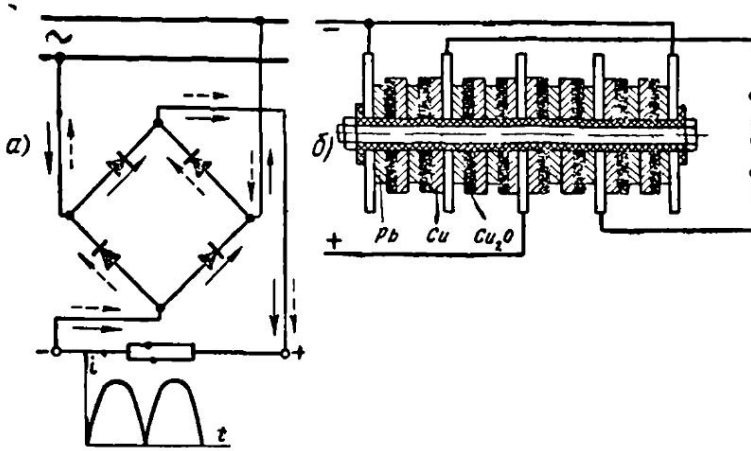


Фиг. 306. Схема двухполупериодного выпрямления однофазиого переменного тока

На фиг. 306 представлена схема выпрямления однофазного тока с использованием средней точки вторичной обмотки трансформатора. Сплошнымн стрелками показан путь тока за одну половину периода, а пунктирными стрелками — за вторую. Во внешней цепи протекает пульсирующий ток. Но в отличие от предыдущей схемы здесь перерыва тока нет, так как используются обе половины синусоиды перемеиного тока. Это — так называемая схема двухполупериодного выпрямления.

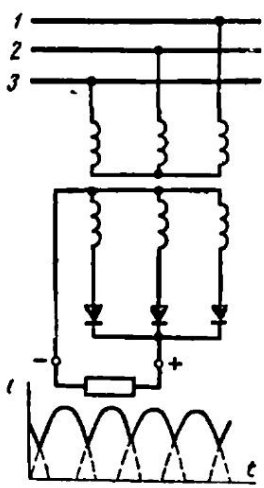
На фиг. 307 показана мостовая схема из четырех выпрямителей, которая позволяет использовать обе половины синусоиды переменного тока, т. е. является также двухполупериодной схемой выпрямления. Путь гока за первую половину периода пока-

ван сплошными стрелками, а за вторую половину периода — пунктирными стрелками. Действительное соединение выпрямителей согласно принципиальной схеме (фиг. 307, *а*) показано на фиг. 307, *б*.



Фиг. 307. Схема включения четырех элементов выпрямителя по мостовой схеме:
а — двухполупериодный выпрямитель, *б* — выпрямитель, собранный из нескольких элементов по этой схеме

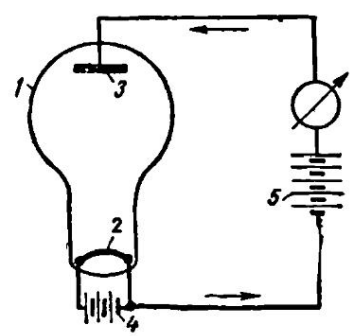
Схема выпрямления трехфазного переменного тока показана на фиг. 308.



Фиг. 308 Схема выпрямления трехфазного переменного тока

§ 157. Кенотрон — ламповый выпрямитель

На фиг. 309 изображен стеклянный баллон *1*, из которого выкачан воздух до высокой степени вакуума (до



Фиг. 309. Принцип действия кенотрона

0,0000001 *мм рт. ст.*). Выкачивание воздуха из баллона производится при помощи особых ртутных насосов, после чего остатки газа удаляются тщательным прокаливанием баллона. При таком глубоком вакууме практически можно считать, что пространство внутри баллона полностью лишено газа. В нижней части баллона расположен один электрод — катод *2;* в верхней части — второй электрод — анод *3*. Катод изготовляется в виде нити из тугоплавкого металла (тантала, молибдена, вольфрама) и замкнут на аккумуляторную батарею накала *4* или другой источник электрического тока напряжением 4—6 *в*. Батарея накала вместе с нитью накала образует катодную цепь.

Как известно, в металлах имеются в большом количестве свободные электроны. При обыкновенной температуре кинетическая энергия свободных электронов настолько мала, что они не могут покинуть поверхность металла. Если же металл нагреть до высокой температуры, то скорость свободных электронов и их кинетическая энергия увеличиваются и накаленный металл начинает испускать электроны. Это явление называется термоэлектронной эмиссией.

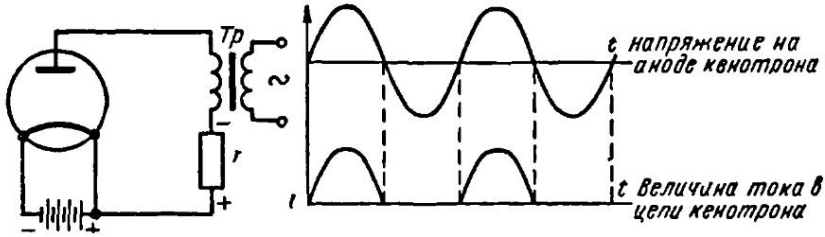
Нить катода, или нить накала, нагретая электрическим током от батареи накала, испускает электроны, которые, скапливаясь около нити, образуют электронное «облако», препятствующее дальнейшему вылету электронов с поверхности нагретой нити. Если включить вторую батарею аккумуляторов *5* (анодную батарею) напряжением 80—100 *в* таким образом, чтобы плюс батареи был соединен со вторым электродом — анодом, а минус батареи был соединен с катодом, то между нитью накала и анодом внутри стеклянного баллона будет образовано электрическое поле.

Под действием электрических сил поля электроны, испускаемые нитью накала, придут в движение, направляясь к аноду. От анода по внешней цепи через анодную батарею электроны направятся к катоду. В цепи установится электрический ток, причем направление его в самом стеклянном баллоне будет от анода к катоду. Путь тока от катода по внешней цепи до анода называется анодной цепью.

С увеличением напряжения анодной батареи увеличивается анодный ток. Это объясняется тем, что по мере возрастания потенциала анода все большее и большее количество электронов будет достигать анода. Наконец, при некотором потенциале анода ток в анодной цепи более не возрастает. Наибольший анодный ток, который может быть при данном накале катода, называется током насыщения. Число электронов, испускаемое накаленным катодом, зависит от величины поверхности катода и температуры нагрева его. Температура катодной нити из вольфрама обычно достигает 2300—2500°. Увеличение нагрева вольфрамовой нити выше указанной температуры приводит к увели-

чению мощности, идущей на нагрев нити, а также к резкому сокращению срока службы катода.

Были проделаны опыты с нитями из различных материалов, с тем чтобы найти нить, которая могла бы давать большой ток насыщения при более низкой температуре. Было обнаружено, что прибавка к вольфраму окиси тория сильно увеличивает эмиссионный ток. В настоящее время торированные катоды изготовляются из вольфрама, на поверхность которого особым способом нанесен очень тонкий слой тория. Торированные катоды нагреваются обычно до 1600—1850°. В результате исследований было замечено также, что окиси щелочно-земельных металлов (бария, кальция, стронция), нагретые уже до 1000°, дают очень сильный электронный поток.



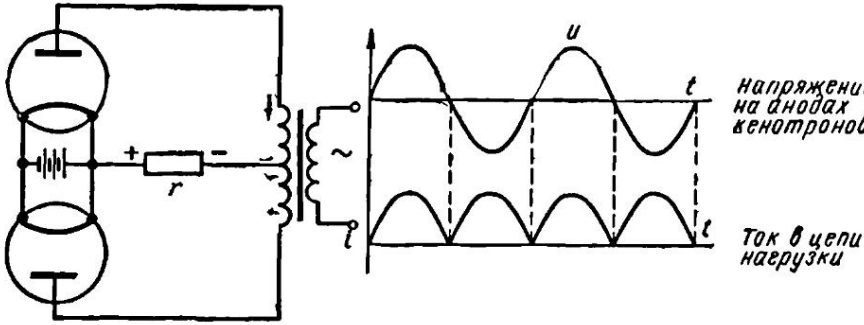
Фиг. 310. Схема включения кенотрона

Металлические (никелевые) катодные нити, покрытые слоем окиси щелочно-земельных металлов, называются оксидными катодами. Рабочая температура таких нитей составляет 900—1200°.

Электроны, испускаемые катодной нитью, под действием электрического поля устремляются к аноду, причем по мере приближения к аноду скорость их увеличивается. Ударяясь о поверхность анода, электроны отдают ему свою кинетическую энергию, вызывая нагрев анодной пластины. Материалом для анода обычно служит никель или молибден.

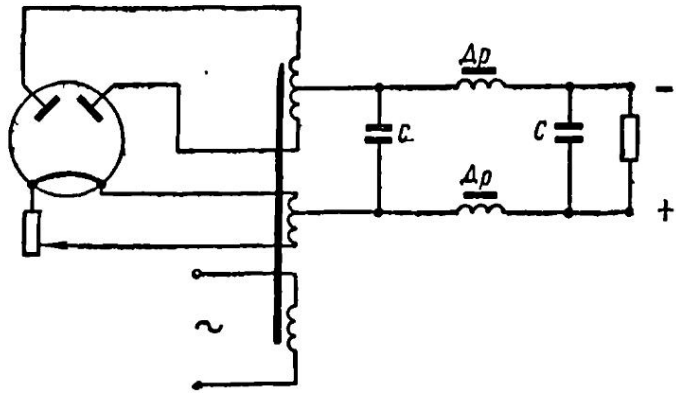
Если пересоединить анодную батарею так, чтобы анод баллона был соединен с минусом батареи, то электроны, испускаемые катодом, станут отталкиваться отрицательно заряженным анодом, и тока в анодной цепи не будет. Следовательно, ток в цепи анода может проходить только в одном направлении: от анода к катоду, т. е. когда анод относительно катода заряжен положительно. Замечательная способность электронной лампы пропускать ток в одном направлении используется для выпрямления переменного тока. Прилагая к цепи анода переменное напряжение, мы получим в анодной цепи лампы выпрямленный пульсирующий ток. Лампа, применяемая для этой цели, называется кенотроном.

На фиг. 310 представлена схема включения кенотрона. Недостатком этой схемы является использование только одной полуволны тока, откуда она и получила название схемы однополупериодного выпрямления. Для использования тока



• Фиг. 311. Схема включения двух кенотронов

в течение полного периода применяются схемы с двухполупериодным выпрямлением. На фиг. 311 дана схема двух кенотронов, а на фиг. 312 — одного кенотрона с двумя анодами. В последней схеме питание катода производится переменным током от специальной обмотки трансформатора. Для сглаживания



Фиг. 312. Схема двуханодного кенотрона

пульсаций выпрямленного тока применяют фильтр, состоящий из конденсаторов и катушек с железом (дроссели).

Пульсирующий выпрямленный ток можно представить состоящим из двух слагающих — постоянной и переменной. Для постоянной слагающей тока конденсаторы представляют очень

большое сопротивление. Наоборот, катушки, не обладающие индуктивным сопротивлением при постоянном токе, дают ему возможность свободно проходить через фильтр. Для переменной слагающей тока конденсаторы представляют очень малое сопротивление. Наоборот, индуктивные катушки представляют большое сопротивление.

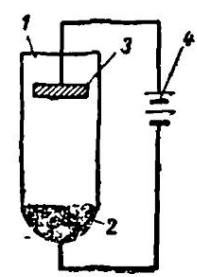
Такое расположение конденсаторов и индуктивных катушек, как показано на фиг. 312, дает возможность переменной слагающей тока свободно проходить через конденсаторы, не заходя к потребителю. В то же самое время постоянная слагающая тока, проходя свободно через индуктивные катушки, направляется в цепь потребителя.

Таким образом, в цепи потребителя практически проходит постоянный ток.

В схеме с двумя кенотронами или одним двуханодным кенотроном ток будет проходить через тот анод, который в данный момент будет положительным относительно катода. Средняя точка обмотки трансформатора, дающей напряжение на аноды кенотрона, служит минусом цепи постоянного тока. Средняя точка обмотки накала катода служит плюсом цепи постоянного тока. Кенотроны применяются в сетевых радиоприемниках, аппаратах для испытания кабелей, рентгеновских аппаратах и т. д.

§ 158. Стеклянные ртутные выпрямители

Действие ртутного выпрямителя основано на так называемой вентильной (односторонней) способности электрической дуги, возникшей в откачанном и заполненном ртутью сосуде, пропускать ток только в одном направлении. Вентиль представляет собой устройство, имеющее малое сопротивление для тока прямого направления и большое сопротивление для тока обратного направления.



Фиг. 313. Устройство стеклянного ртутного выпрямителя

Ртутные выпрямители бывают стеклянные, металлические и стеклянно-металлические.

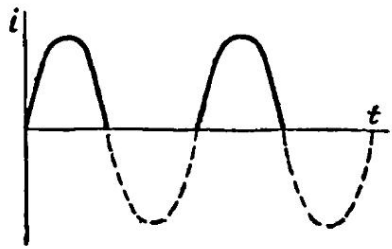
Рассмотрим устройство стеклянного ртутного выпрямителя и рабочий процесс в нем. В стеклянный сосуд *1* (фиг. 313) налита ртуть *2*. Сверху впаян угольный электрод *3*. Воздух из сосуда выкачан и сосуд запаян.

Если присоединить аккумуляторную батарею *4* так, чтобы положительный полюс батареи был соединен с угольным электродом (анодом), а отрицательный полюс батареи был соединен с другим электродом — ртутью (катодом), то между анодом и катодом возникнет электрическое поле.

Даже при комнатной температуре ртуть испаряется с поверхности катода и пары ее заполняют сосуд. Если при помощи спе-

цнального устройства возбудить в сосуде дуговой разряд, то с поверхности ртути, так называемого катодного или светлого пятна, начнут вылетать электроны, которые под действием электрического поля будут двигаться по направлению к аноду. На пути своего движения электроны ударяются о нейтральные молекулы паров ртути. Происходит ионизация толчком, в результате чего образуются положительные и отрицательные ионы.

Ионизация паров ртути сопровождается появлением в сосуде ртутного выпрямителя интенсивного свечения фиолетового цвета.



Фиг. 314. Выпрямленный ток в цепи ртутного выпрямителя

В цепи начнет проходить электрический ток. Электроны совместно с отрицательными ионами ртути двигаются к аноду. В то же время положительные ионы, притягивающиеся катодом, ударяются о поверхность ртути, образуя вышеупомянутое раскаленное катодное пятно. Электрическое поле, образованное положительными зарядами ионов, способствует вырыванию электронов с поверхности ртути и образованию потока электронов.

Ртутные пары, соприкасаясь с холодными стенками стеклянного сосуда, конденсируются в капли ртути, которые стекают вниз.

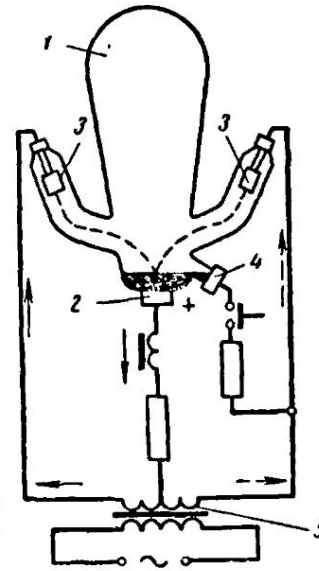
Если пересоединить аккумуляторную батарею так, чтобы к угольному электроду *3* был присоединен минус батареи, а к ртутному электроду *2* — плюс батареи, то при тех же условиях (наличие светлого пятна на катоде) ток в цепи проходить не сможет. Сосуд с ртутью, включенный в цепь переменного тока, сможет пропускать ток только в одном направлении и преобразует переменный ток в пульсирующий.

На фиг. 314 представлена кривая однофазного переменного тока. Если каждая верхняя полуволна синусоиды будет соответствовать направлению тока от холодного электрода к нагретому, то ток в цепи будет проходить только в соответствующие этой полуволне моменты времени. Каждая отрицательная полуволна синусоиды окажется срезанной, и ток в цепи в соответствующие этой полуволне моменты времени проходить не будет. Таким образом, в цепи будет иметь место пульсирующий ток.

Во избежание перерыва тока однофазные ртутные выпрямители устраиваются с двумя анодами. На фиг. 315 представлена схема включения двуханодного ртутного выпрямителя в цепь однофазного переменного тока. Такие выпрямители изготовляются на ток до 50 *а* и напряжение до 500 *в*. Из стеклянной колбы *1* откачан воздух и пространство заполнено парами ртути при

давлении от 0,001 до 0,05 *мм рт. ст.* В нижней части стеклянной колбы помещается жидкая ртуть, внутрь которой входит молибденовый стержень *2*, впаянный в стекло колбы. Два графитовых анода *3* расположены в стеклянных отростках — рогах колбы. Для зажигания дуги устраивается дополнительный анод *4* с небольшим количеством ртути.

При пуске ртутного выпрямителя нажимают кнопку в цепи зажигания и стеклянную колбу выпрямителя наклоняют в сторону так, чтобы ртуть анода зажигания *4* соединилась со ртутью катода *2*. При возвращении колбы в первоначальное положение происходит разрыв ртути в месте разрыва возникает электрическая дуга, основанием которой на ртути катода и является вышеупомянутое светлое пятно. Электроны, вылетая с поверхности катодного пятна, устремляются к главным анодам. Включая сопротивление потребителя к катоду колбы выпрямителя (плюс внешней сети) и к нулевой точке трансформатора *5* (минус внешней сети), получим выпрямленный ток.



Фиг. 315. Схема включения стеклянного двуханодного ртутного выпрямителя в цепь однофазного переменного тока

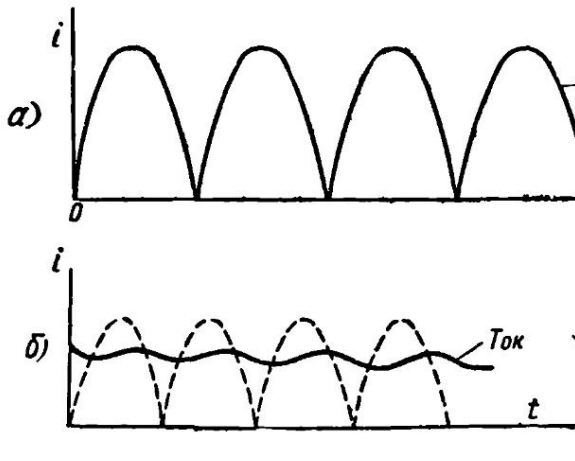
Стрелками показано направление этого тока: сплошными — при положительной полуволне переменного тока, пунктирными — при отрицательной полуволне.

Из фиг. 316, *а* видно, что в определенные моменты времени выпрямленный ток становится равным нулю. В эти моменты дуга в ртутном выпрямителе может погаснуть и ее придется зажигать снова. Для сглаживания пульсаций тока в цепь выпрямителя включают катушку индуктивности со сталью. На фиг. 316, *б* показана кривая выпрямленного тока в цепи с катушкой.

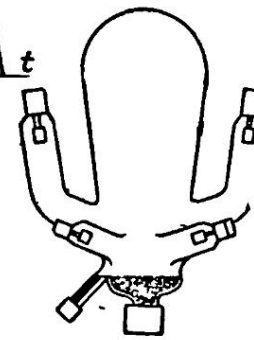
При высокой температуре анода он начнет также испускать электроны и выпрямитель будет пропускать обе полуволны синусоиды переменного тока. Это явление называется обратным зажиганием. Оно может произойти при плохом охлаждении выпрямителя, перегрузке, при наличии посторонних газов в колбе. Обратное зажигание сопровождается коротким замыканием вторичной обмотки питающего трансформатора. Для защиты от действий короткого замыкания устанавливаются специальные быстродействующие автоматы, которые при появлении обратного зажигания отключают выпрямитель.

Для выпрямления токов высокого напряжения служат выпрямители, аноды которых устраиваются в высоких стеклянных отростках. Высоковольтные выпрямители изготовляют на 3000, 10 000 *в* и другие напряжения.

При резком уменьшении или прекращении тока в цепи электрическая дуга в колбе может погаснуть и ее нужно зажигать вновь. Во избежание этого применяют выпрямители с независи-



Фиг. 316. Кривые тока, выпрямленного двухаподным выпрямителем, включенным в сеть однофазного тока:
а — без дроссельной катушки, *б* — с дроссельной катушкой



Фиг. 317. Стеклянный ртутный выпрямитель с независимым возбуждением

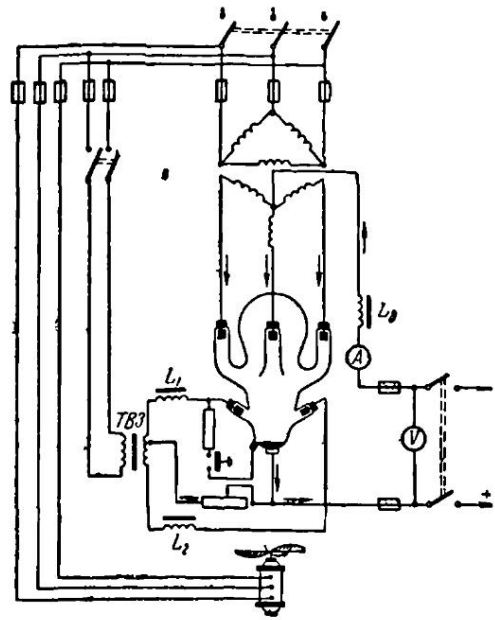
мым возбуждением. На фиг. 317 показано устройство колбы стеклянного ртутного выпрямителя с независимым возбуждением. Аноды независимого возбуждения (число которых обычно равно двум) получают питание от отдельного трансформатора. Их назначение состоит в том, чтобы поддержать электрическую дугу при резком уменьшении или полном прекращении выпрямленного тока.

Низковольтные ртутные выпрямители от 20 *а*, а также высоковольтные выпрямители устраиваются с искусственным охлаждением при помощи электрического вентилятора.

Для преобразования трехфазного переменного тока в постоянный ток служат трехфазные ртутные выпрямители (фиг. 318). Главные аноды выпрямителя получают питание от трехфазного трансформатора. Нулевая точка трансформатора является отрицательным полюсом сети постоянного тока. Катод колбы выпрямителя является положительным полюсом сети

постоянного тока. Аноды независимого возбуждения питаются от отдельного трансформатора *ТВ3* через дроссели L_1 и L_2. Сопротивление служит для ограничения тока в цепи зажигания. Электрический вентилятор для охлаждения колбы включается одновременно с трансформатором.

При выпрямлении трехфазного тока кривые выпрямленного тока перекрывают друг друга и пульсации тока становятся мень-



Фиг. 318. Трехфазный стеклянный ртутный выпрямитель и его включение в сеть

ше, чем при работе в сети однофазного тока (фиг. 319). Катушка индуктивности в этом случае применяется лишь для сглаживания пульсаций выпрямленного тока.

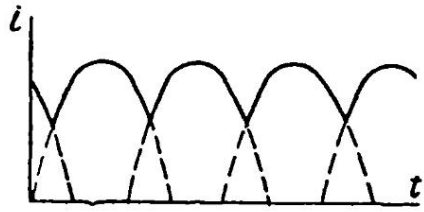
Обозначение типа ртутного выпрямителя состоит из букв и цифр. Буква В обозначает выпрямительную колбу; цифра перед буквой В показывает число рабочих анодов колбы. Буква Н указывает на наличие независимого возбуждения. Цифра, стоящая после букв, указывает максимально допустимый выпрямленный ток в амперах.

В высоковольтных выпрямителях после тока указывается величина рабочего выпрямленного напряжения в вольтах.

Примеры: 2В-12 — колба ртутного выпрямителя с двумя рабочими анодами на 12 *а* выпрямленного тока.

4В-6 — колба ртутного выпрямителя с четырьмя рабочими анодами на 6 *а* выпрямленного тока.

3ВН-6-10 000 — колба ртутного выпрямителя с тремя рабочими анодами, с независимым возбуждением на 6 *а* выпрямленного тока при предельном рабочем напряжении в 10 000 *в*.



Фиг. 319. Кривые выпрямленного трехфазного тока

Ртутные выпрямители имеют малое падение напряжения в дуге. В зависимости от конструкции оно колеблется в пределах от 16 до 25 *в*. Вследствие малого падения напряжения ртутные выпрямители имеют высокий к. п. д. (до 86%).

Стеклянные ртутные выпрямители применяются для зарядки аккумуляторных батарей, питания дуговых фонарей для киноаппаратов, силовой и осветительной сети постоянного тока, для целей электролиза, для питания оперативных цепей постоянного тока электрической аппаратуры и т. д.

§ 159. Металлические ртутные выпрямители

Для токов свыше 500 *а* применяются металлические ртутные выпрямители.

На фиг. 320 представлена схема металлического ртутного выпрямителя. Металлический корпус выпрямителя *1* имеет водяное охлаждение. Катодная чаша *2*, изолированная от корпуса, наполнена ртутью. Главные аноды *3* пропущены через анодные рукава *4*, которые предохраняют аноды от ртути, сконденсированной из ее паров. Внутри выпрямителя помещены анод зажигания *5* и аноды независимого возбуждения *6*. Верхний конец анода зажигания прикреплен к стальному сердечнику, помещенному в соленонде. Если замкнуть цепь тока, питающего соленоид, то сердечник втягивается и опускает анод зажигания, который на короткое время погружается в ртуть и затем под действием пружины возвращается в прежнее положение. Дуга, возникшая между анодом зажигания и ртутью, перекидывается на аноды возбуждения, которые поддерживают дугу, не давая ей погаснуть.

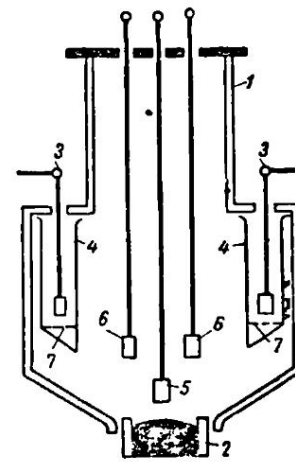
В местах соединения отдельных частей выпрямителя поставлены уплотнения, обеспечивающие поддержание вакуума внутри выпрямителя. Так как надежная работа выпрямителя зависит больше всего от того, какой вакуум поддерживается в его корпусе, то металлические выпрямители снабжаются насосами, на-

значение которых состоит в том, чтобы постоянно поддерживать высокий вакуум.

Регулировка выпрямленного напряжения у выпрямителей производится при помощи секционированного трансформатора или автотрансформатора, имеющих ряд ответвлений от своих обмоток. Изменяя величину напряжения переменного тока, питающего выпрямитель, меняют величину выпрямленного напряжения.

Выпускаются также выпрямнтели, у которых регулировка выпрямленного напряжения производится управляющими сетками 7 (фиг. 320), располагающимися перед главными анодами.

Металлические ртутные выпрямители, работающие в сетях трехфазного тока, изготовляются с тремя, шестью, а иногда и с двенадцатью главными анодами. Питание анодов многофазных выпрямителей пронзводится от трансформатора, вторичная обмотка которого путем надлежащего соединения отдельных частей дает шестифазный или двенадцатифазный ток.



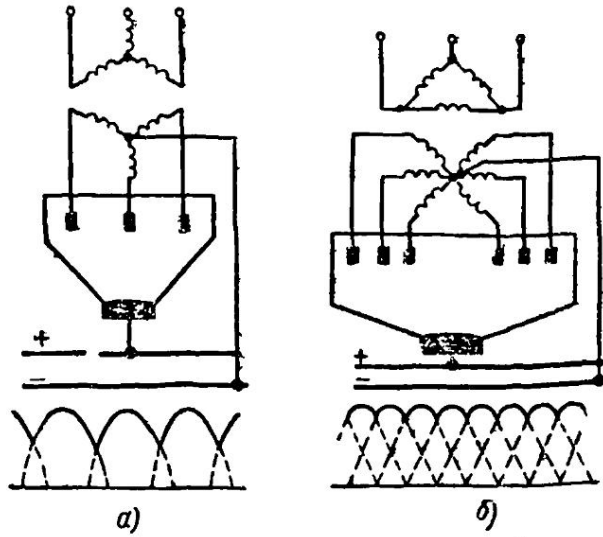
Фиг. 320. Схема устройства металлического ртутного выпрямителя

На фиг. 321, *а* и *б* показаны принципиальные схемы трехфазного и шестифазного ртутных выпрямителей.

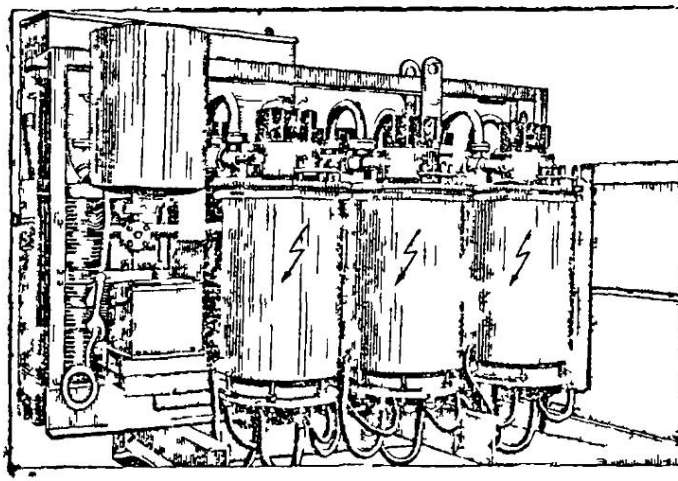
Если все главные аноды помещены в одном баке, то такие выпрямители называются многоанодными. Если же каждый главный анод помещен в отдельный бак, то такой выпрямитель называется одноанодным.

На некоторых установках работают металлическне многоанодные выпрямители старого типа РВ (Р — ртутиый, В — выпрямитель). Кроме букв, этот тип выпрямителей нмеет цифровое обозначение (РВ-40; РВ-20/30; РВ-20/16). Числитель дроби указывает колнчество сотен ампер при напряженин 600 *в*, а знаменатель — количество сотен вольт рабочего выпрямленного напряжения. В настоящее время выпрямители типа РВ сняты с производства. Сейчас наша промышленность выпускает многоанодные выпрямители РМНВ-500 и РМНВ-1000 и одноанодные выпрямители РМНВ-500×6, РМНВ-1000×6, РМНВ-500×12 н РМНВ-1000×12.

Тип РМНВ обозначает: Р — ртутный, М — металлическнй, Н — с насосамн для поддержанння вакуума, В — с водяным охлаждением. Чнсло после буквенного обозначения указывает допускаемый ток вентиля при напряжении 600 *в*, а второе число — колнчество вентилей в комплекте.



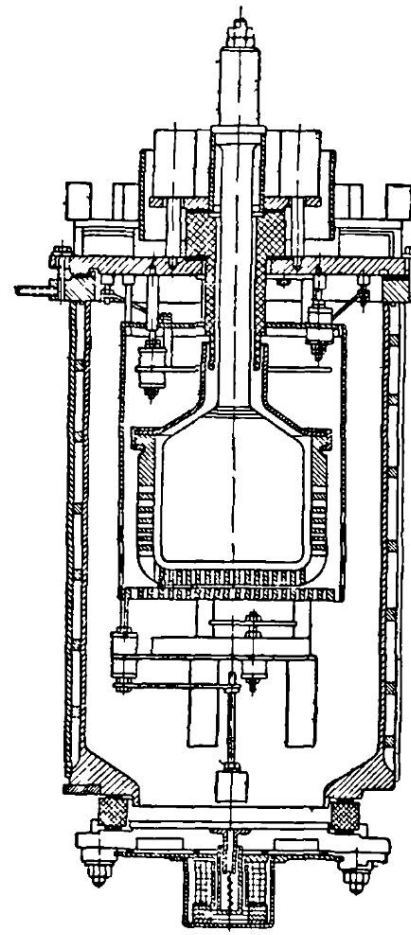
Фиг. 321. Принципиальная схема металлического ртутного выпрямителя:
а — для трехфазного тока, *б* — для шестифазного тока



Фиг. 322. Внешний вид одноанодного выпрямителя РМНВ-500×6

Одноанодные выпрямители имеют следующие преимущества перед многоанодными: 1) возможность применения обычных трехфазных трансформаторов вместо специальных многофазных при применении мостовой схемы выпрямления; 2) меньшее падение напряжения в дуге выпрямителя; 3) разделение дуг отдельных анодов по различным вакуумным корпусам; 4) уменьшенные размеры; 5) более высокий к. п. д.; 6) лучшие условия охлаждения.

На тяговых подстанциях электрифицированного городского транспорта (трамвай, троллейбус, метрополитен), а также на тяговых подстанциях пригородных и магистральных электрифицированных железных дорог наиболее широкое применение получил выпрямитель РМНВ-500×6 (фиг. 322 и 323). Этот выпрямитель состоит из шести ртутных вентилей, смонтированных на общей раме. Каждый вентиль через вакуумный кран сообщается с общей вакуумной трубой. Одним из основных условий надежной работы ртутного выпрямителя является создание и поддержание в них соответствующего разрежения. Дежурный персонал, обслуживающий ртутные выпрямители, обязан поддерживать давление в корпусе выпрямителя от 0,1 до 0,5 микрона ртутного столба (1 микрон = 0,001 *мм*). Воздух и газы, попадающие в выпрямитель через уплотнения и выделяющиеся при работе выпрямителя, отсасываются двумя насосами: ртутным диффузионным насосом и насосом предварительного разрежения. Ртутный насос соединен с общей вакуумной трубой, через которую остатки воздуха и газов из бака выпрямителя подаются в резервуар предварительного разрежения, откуда насосом предварительного разрежения выбрасываются в атмосферу. Для измерения



Фиг. 323. Разрез вентиля одноанодного выпрямителя РМНВ-500×6

давления газов в корпусе выпрямителя применяются ртутные манометры.

Аппаратура для зажигания и возбуждения выпрямителя, а также для питания управляющих сеток размещается в шкафу управления выпрямителем (ШРВ).

Охлаждение многоанодных выпрямителей производится водопроводной водой по разомкнутой системе охлаждения. При помощи резиновых шлангов вода подводится к выпрямителю, омывает стенки бака и сбрасывается в канализацию.

Охлаждение одноанодных выпрямителей производится дистиллированной водой по замкнутому циклу. Центробежный водяной насос гонит дистиллированную воду, которая отнимает тепло от баков выпрямителя, нагревается и поступает в змеевик теплообменника, который охлаждается проточной водопроводной водой. Остывшая в теплообменнике дистиллированная вода вновь подается насосом для охлаждения выпрямителя.

Металлические ртутные выпрямители дают электрическую энергию постоянного тока напряжением 600 *в* — для трамвая и троллейбуса, 750 *в* — для метрополитена, 1500 *в* и 3000 *в* для пригородных и магистральных электрифицированных железных дорог.

Контрольные вопросы

1. Зачем нужны выпрямители и каких типов они бывают?
2. Как устроены меднозакисные выпрямители, каков принцип их действия и где они применяются?
3. Как устроены селеновые выпрямители, каков принцип их действия и где они применяются?
4. Как устроены германиевые (кремниевые) выпрямители и какие они имеют преимущества перед меднозакисными и селеновыми выпрямителями?
5. На каком принципе работают ртутные выпрямители?
6. Какие меры применяют для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в ртутных выпрямителях?
7. Как устроены металлические ртутные выпрямители и где они применяются?
8. Чем отличаются многоанодные ртутные выпрямители от одноанодных?

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 160. Общие замечания об электроизмерительных приборах

Если для определения времени служат часы, для измерения длины, площади и объема служат соответственно линейные, квадратные и кубические меры, для измерения веса служат весы и т. д., то для измерения электрических величин применяются специальные электроизмерительные приборы. Электроизмерительные приборы нашли себе широкое применение для рациональной эксплуатации, контроля и защиты электрических установок в различных отраслях народного хозяйства.

В электроизмерительных приборах различают подвижную и неподвижную части прибора. Проявление электрического тока, например его тепловые, магнитные и механические действия, положены в основу взаимодействия подвижной и неподвижной частей прибора. Возникающий вследствие этого вращающий момент поворачивает подвижную часть прибора вместе с указателем (стрелкой).

Под действием вращающего момента подвижная система поворачивается на угол тем больший, чем больше будет измеряемая величина. В противовес вращающему моменту должен быть создан равный и противоположный противодействующий момент, так как иначе при любых значениях измеряемой величины (кроме нуля) стрелка будет отклоняться в конец шкалы до упора.

Обычно противодействующий момент создается при помощи спиральных пружин из фосфористой бронзы.

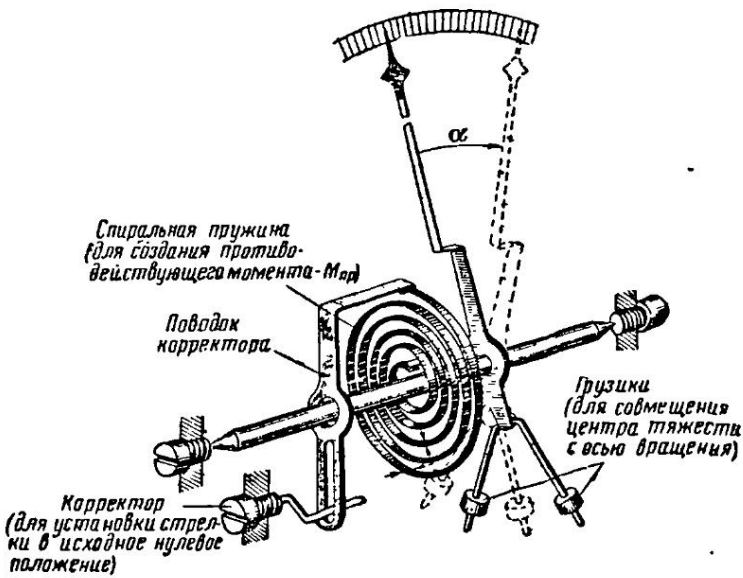
Трение, как известно, направлено всегда против движения. Поэтому при движении подвижной части прибора трение будет мешать этому и искажать показания прибора. Для уменьшения трения подвижная часть в некоторых конструкциях крепится на кернах в подпятниках из камня высокой твердости (рубина, сапфира, агата). На фиг. 324 дана конструкция оси и подпятника электроизмерительных приборов. Для предохранения кернов и

подпятников от разрушения при переносе или транспортировке некоторые приборы имеют приспособление, называемое а р р е т и р о м, которое поднимает подвижную часть и закрепляет ее неподвижно.

Под влиянием тех или иных причин противодействующий момент прибора изменяется. Например, при различных температурах спиральные пружины имеют неодинаковую упругость.



Фиг. 324. Конструкция оси и подпятника электроизмерительного прибора

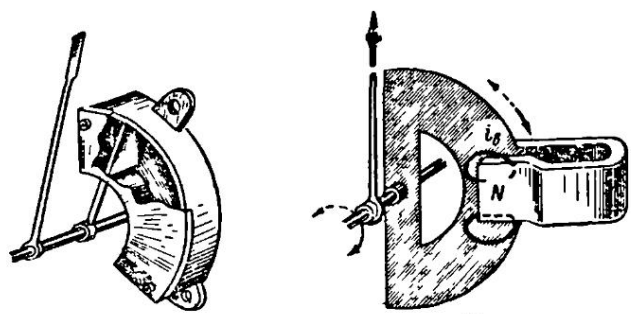


Фиг. 325. Конструкция подвижных частей электроизмерительного прибора с корректором

В этом случае стрелка прибора будет отходить от нулевого деления. Для установки стрелки в нулевое положение служит приспособление, называемое к о р р е к т о р о м. На фиг. 325 показана конструкция подвижной части электроизмерительного прибора с корректором. Измеряющий механизм прибора заключен в корпус, защищающий его от механических воздействий и попадания пыли, воды, газов.

Одним из условий, предъявляемых к прибору, является быстрое успокоение его подвижной части, достигаемое путем устройства успокоителей, использующих механическое сопротивление среды (воздух, масло) или магнитоиндукционное торможение. На фиг. 326 показаны конструкции воздушного и магнитоиндукционного успокоителей.

Наибольшее обозначенное на шкале прибора значение величины, которое прибор может измерить непосредственно, называется **номинальным показанием** прибора. При производстве электрических измерений обычно показание прибора отличается от действительного значения измеряемой величины.



Фиг. 326. Конструкции успокоителей:
а — воздушного, *б* — магнитоиндукционного

Разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины называется **абсолютной погрешностью**. Так, например, если амперметр показал величину тока, равную 5 *а*, а действительное значение тока, измеренное образцовым амперметром, равно 4,9 *а*, то абсолютная погрешность равна $5-4{,}9=0{,}1$ *а*. Зная абсолютную погрешность прибора, можно вносить поправку при измерениях и получать действительное значение измеряемой величины.

Отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины называется **относительной погрешностью**. В примере, приведенном выше, относительная погрешность равна:

$$\frac{0{,}1}{4{,}9}=0{,}02 \text{ или } 2\%.$$

Точность самого прибора характеризуется основной приведенной погрешностью. **Приведенной погрешностью** прибора называется отношение абсолютной погрешности к номинальному показанию прибора. Приведенная погрешность прибора, определенная при нормальных условиях (нормальное по-

ложение шкалы, нормальная температура 20° С, отсутствие внешних магнитных полей, отсутствие вблизи поверяемого прибора больших ферромагнитных масс), называется основной приведенной погрешностью. Чувствительность прибора характеризуется величиной угла отклонения подвижной части при измерении определенной электрической величины. Электроизмерительный прибор, включенный в сеть, не должен изменять режим работы сети и поэтому его собственное потребление мощности должно быть минимальным.

Осиовными факторами при выборе прибора являются: 1) надежиость в эксплуатации, 2) простота обращения с прибором, 3) точность, 4) собственный расход мощности, 5) внешняя форма, 6) вес, 7) стоимость.

§ 161. Классификация электроизмерительных приборов

Электроизмерительные приборы различаются по следующим признакам:

1) по роду измеряемой величины;
2) по роду тока;
3) по степени точности;
4) по принципу действия;
5) по способу получения отсчета;
6) по характеру применения.

Кроме этих признаков, электроизмерительные приборы можно также отличать по:

1) способу монтирования;
2) способу защиты от внешних магнитных или электрических полей;
3) выносливости в отношении перегрузок;
4) пригодности к примененню при различных температурах,
5) габаритным размерам и другим признакам.

Рассмотрим важнейшие признаки различия приборов.

Для измерения электрических величин применяются различные электроизмерительные приборы, а именно: тока — амперметр; напряжения — вольтметр; электрического сопротивления — омметр, мосты сопротивлений; мощности — ваттметр; электрической энергии — счетчик; частоты переменного тока — частотомер; коэффициента мощности — фазометр.

По роду тока приборы делятся на приборы постоянного тока, приборы переменного тока и приборы постоянного и переменного тока. По степени точности приборы делятся на семь классов — 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 и 4. Цифры указывают значение допустимой приведенной погрешности в процентах.

По принципу действия приборы подразделяются на магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические (ферро-

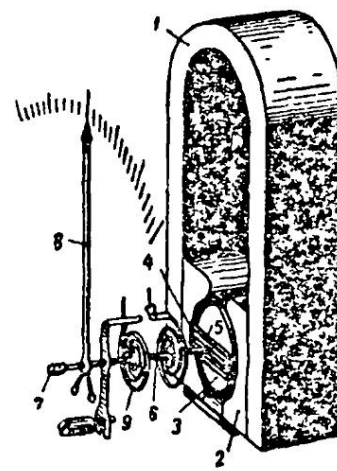
динамические), индукционные, тепловые, вибрационные, термоэлектрические, детекторные и др.

По способу получения отсчета приборы могут быть с непосредственным отсчетом и самозаписью.

По характеру применения приборы делятся на стационарные, переносные и для подвижных установок.

§ 162. Магнитоэлектрические измерительные приборы

Приборы магнитоэлектрической системы работают на принципе взаимодействия катушки с током и поля постоянного магнита. На фиг. 327 показано устройство прибора этой системы. Сильный постоянный подковообразный магнит *1*, изготовленный из кобальтовой, вольфрамовой или никель-алюминиевой стали, создает магнитное поле. К концам магнита приведены полюсные наконечники *2* из мягкой стали, имеющие цилиндрические выточки. Между полюсными наконечниками неподвижно укреплен стальной цилиндр *3*, служащий для уменьшения сопротивления магнитной цепи.



Фиг. 327. Устройство прибора магнитоэлектрической системы

Кроме того, цилиндр играет и другую роль. Магнитные линии выходят из полюсных наконечников и, в силу того что магнитная проницаемость стали значительно больше, чем у воздуха, раднально входят в цилиндр, образуя в воздушном зазоре практически однородное магнитное поле. Такое же поле создается при выходе магнитных линий из цилиндра. Цилиндр охватывает легкая алюминиевая рамка *4* с намотанной на ней обмоткой (катушкой) *5*, выполненной из изолированной медной проволоки. Рамка сидит на оси *6*, лежащей в подпятниках *7*. На оси крепится также алюминиевая стрелка *8*. Противодействующий момент создается двумя плоскими спиральными пружинами *9*, служащими одновременно для подвода тока к обмотке прибора.

Зажимы прибора выводятся наружу прибора и соединяются проводниками со спиральными пружинками.

При пропускании тока по виткам обмотки в результате взаимодействия тока в проводниках и магнитного поля подковообразного магнита возникает механическая сила, направление которой можно определить по «правилу левой руки». На другой стороне обмотки возникает такая же по величине сила, но проти-

воположного направления. Образуется пара сил. Под действием этой пары сил катушка будет поворачиваться. Сила взаимодействия зависит от величины магнитной индукции B, тока в катушке I, числа витков катушки w и активной длины катушки l:

$$F = BIlw.$$

Колебания алюминиевой рамки с обмоткой в магнитном поле вызывают появление в рамке индуктированного тока, который по правилу Ленца будет противодействовать этим колебаниям и тем самым успокаивать подвижную часть прибора. Неизменность индукции во всех точках воздушного зазора обеспечивает пропорциональность между током в обмотке и углом поворота подвижной части, вследствие чего шкала прибора равномерна.

Магнитоэлектрические приборы являются наиболее чувствительными и точными из всех существующих приборов с непосредственным отсчетом. Они изготовляются как в виде лабораторных многопредельных приборов класса точности 0,1—0,5, так и в виде технических приборов класса 1—1,5.

Обладая большой точностью, высокой чувствительностью, равномерной шкалой, малым потреблением энергии (0,5—3 *вт*), малым влиянием на них внешних магнитных полей, хорошим успокоением, магнитоэлектрические приборы нашли широкое применение в цепях постоянного тока в качестве амперметров, вольтметров, миллиамперметров, милливольтметров и т. д.

К недостаткам приборов этой системы относятся: высокая стоимость, чувствительность к перегрузкам и пригодность только для постоянного тока. В самом деле при пропускании по обмотке переменного тока подвижная часть прибора должна была бы отклоняться то в одну, то в другую сторону. Но ввиду быстрых изменений тока в катушке подвижная часть, обладая инерцией, не будет успевать за ними, и стрелка прибора останется неподвижной. Для измерения малых значений заряда, тока и напряжения применяются гальванометры, получившие преимущественное применение при нулевых методах измерений, когда нужно обнаружить отсутствие тока в той или иной части измерительной схемы. При измерениях на постоянном токе почти исключительно применяются магнитоэлектрические гальванометры.

Принцип действия и устройство магнитоэлектрических гальванометров те же, что и других приборов системы. Однако у гальванометров приняты меры, обеспечивающие уменьшение веса подвижной части прибора и уменьшение трения. Многовитковая катушка (рамка) гальванометров выполняется из изолированного провода и для придания ей жесткости пропитывается обмоточным лаком. Рамка имеет так называемые безмоментные волоски для подвода к ней тока.

У грубых гальванометров (микроамперметров) подвижная часть установлена на осях и кернах. Гальванометры высокой чувствительности имеют рамку, подвешенную на длинных нитях

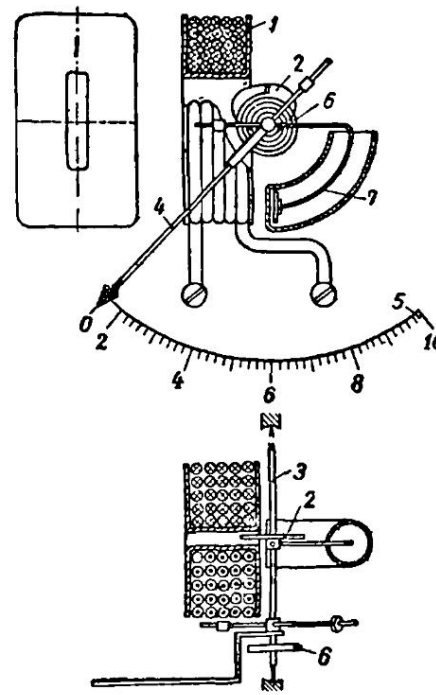
из фосфористой бронзы или на так называемых растяжках. Рамка высокочувствительных гальванометров снабжается зеркальцем. Световой луч посылается от специального источника света на зеркальце и, отразившись от него, попадает на шкалу, установленную на определенном расстоянии от гальванометра.

Гальванометры могут непосредственно измерять токи от 10^{-6} до 10^{-12} *а*.

§ 163. Электромагнитные измерительные приборы

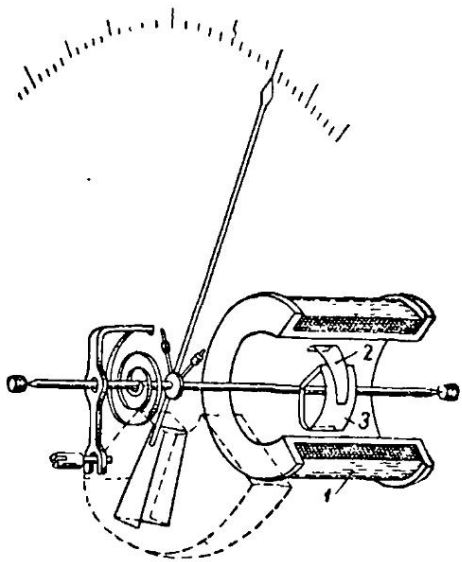
Электромагнитные измерительные приборы работают на принципе взаимодействия между током катушки и магнитным полем подвижного сердечника из ферромагнитного материала. По конструкции электромагнитные приборы делятся на два типа: приборы с плоской катушкой и приборы с круглой катушкой. Рассмотрим устройство первого типа приборов (фиг. 328).

Обмотка прибора представляет собой плоскую катушку *1* со щелью. Обмотка катушки у вольтметров выполняется из тонкой (диаметр 0,05—0,1 *мм*) медной проволоки с большим числом витков (2000—10 000). Обмотка амперметров на токи до 30 *а* изготовляется из небольшого числа витков толстой проволоки. На токи до 200 *а* обмотка выполняется из медной ленты или в виде одного шинного витка (на токи 300—500 *а*). Второй основной частью прибора является сердечник из ферромагнитного материала (например, пермаллоя) в форме листка *2*, укрепленного эксцентрично на оси прибора *3*. При прохождении тока по виткам катушки возникает магнитное поле, которое втягивает сердечник в щель катушки тем больше, чем больший ток протекает по виткам катушки. Укрепленная на оси стрелка *4* будет отклоняться по шкале *5*. Противодействующий момент создается спиральной пружиной *6*,



Фиг. 328. Устройство прибора электромагнитной системы с плоской катушкой

связанной одним концом с осью, а другим концом с неподвижной частью прибора. Для успокоения электромагнитных приборов обычно применяются воздушные успокоители *7*. Поршенек успокоителя, закрепленный на оси при помощи проволоки, перемещаясь в изогнутом цилиндре, испытывает со стороны воздуха в цилиндре сопротивление своим колебаниям, что приводит к успокоению стрелки. Изменение величины тока в катушке вызывает непропорциональное изменение угла поворота стрелки, поскольку вращающий момент, действующий на подвижную систему, зависит от квадрата тока. Поэтому шкала электромагнитного прибора неравномерна.



Фиг. 329. Приборы электромагнитной системы с круглой катушкой

Устройство прибора с круглой катушкой показано на фиг. 329. Ток, проходя по виткам катушки *1*, создает магнитное поле и намагничивает два железных сердечника: сердечник *2*, укрепленный неподвижно с внутренней стороны катушки, и другой *3*, закрепленный на оси прибора. Близлежащие края сердечников намагничиваются одноименно, и поэтому сердечник *3*, отталкиваясь от сердечника *2*, будет поворачивать ось прибора.

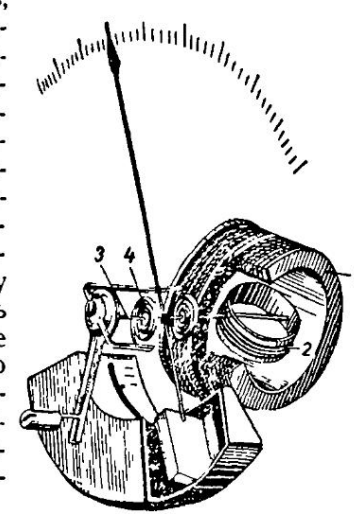
Внешние магнитные поля оказывают влияние на работу электромагнитного прибора, но железный кожух прибора значительно ослабляет это влияние. Изменение направления тока в обмотке прибора приводит к перемагничиванию сердечника (или сердечников), и сила взаимодействия не меняет своего направления. Поэтому электромагнитные приборы могут работать в цепях постоянного и переменного токов. При переменном токе прибор будет показывать действующее значение тока или напряжения. Потребление мощности в амперметрах составляет 2—8 *вт*, в вольтметрах 5—6 *вт*. Простота конструкции, дешевизна, возможность выдерживать перегрузку, пригодность для постоянного и переменного токов привели к тому, что приборы электромагнитной системы нашли себе широкое применение для технических измерений. К недостаткам прибора нужно отнести малую точность, неравномерность шкалы, зависимость показаний прибора от внешних магнитных полей и от частоты. Электромагнит-

ные приборы изготовляются главным образом в качестве технических щитовых приборов классов точности 1; 1,5; 2,5.

Придавая специальную форму сердечнику и изменяя его расположение относительно катушки, можно добиться некоторого уменьшения неравномерности шкалы у этих приборов.

§ 164. Электродинамические измерительные приборы

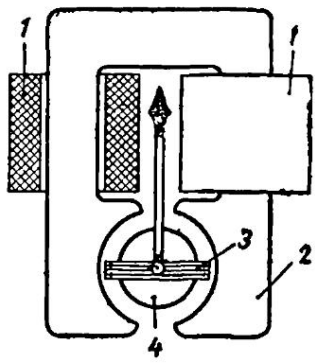
Принцип действия электродинамических приборов основан на взаимодействии магнитных полей двух катушек: одной, неподвижно закрепленной, и другой, сидящей на оси и могущей поворачиваться. На фиг. 330 показано устройство электродинамического прибора. Катушка *1* (здесь, состоящая из двух половин) неподвижно закреплена. К подвижной катушке *2*, укрепленной на оси прибора *3*, ток подводится через спиральные пружины *4*, которые одновременно служат для создания противодействующего момента. При пропускании тока по виткам обеих катушек они создадут магнитные поля, которые, взаимодействуя между собой, будут стремиться повернуть катушку *2* так, чтобы ее магнитное поле и поле катушки *1* совпадали по направлению. Кроме круглых катушек, встречаются конструкции приборов с прямоугольными катушками. Магнитное поле каждой катушки зависит от тока, поэтому сила взаимодействия обеих катушек пропорциональна квадрату тока. Следовательно, шкала прибора неравномерна. Успокоение приборов этой системы воздушное, так как применение электромагнитного тормоза вызвало бы искажение показаний прибора.



Фиг. 330. Электродинамический прибор с круглой катушкой

Это объясняется тем, что собственные магнитные поля катушек очень малы и сильное поле постоянного магнита электромагнитного тормоза оказывало бы влияние на работу прибора. Одновременное изменение направления тока в обеих катушках не меняет направления силы взаимодействия. Поэтому электродинамические приборы применяются в цепях как постоянного, так и переменного тока. В цепях переменного тока приборы этой системы показывают действующее значение измеряемой величины Точность электродинамических приборов велика (класс точности — 0,2—0,5), и поэтому они нашли себе применение как контрольные приборы для измерений на переменном токе. К не-

достаткам приборов нужно отнести достаточно большой расход мощности, составляющий в амперметрах 5—10 *вт*, в вольтметрах 7—15 *вт*, чувствительность к перегрузкам и влияние на показание прибора внешних магнитных полей вследствие слабого собственного поля прибора. При перегрузках прибора спиральные пружинки теряют упругость и могут перегореть.



Фиг. 331. Схема устройства ферродинамического прибора

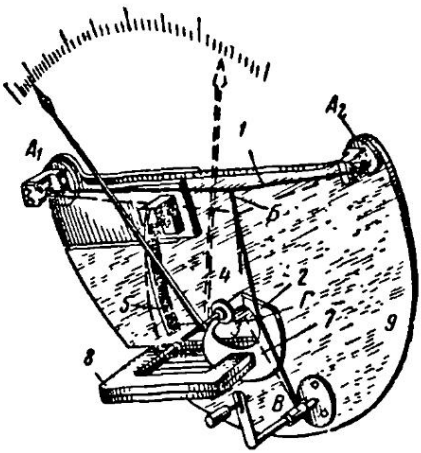
Другой разновидностью электродинамических приборов являются ферродинамические приборы (фиг. 331). Неподвижная катушка *1* наматывается на ярмо *2* из листовой электротехнической стали. Внутри подвижной катушки *3* закреплен стальной цилиндр *4*. Подвижная катушка вращается вокруг цилиндрического сердечника. Усиление магнитного поля прибора приводит к увеличению вращающего момента и к уменьшению влияния внешних магнитных полей. Но присутствие железа имеет и отрицательное влияние, так как возникают дополнительные погрешности (например, при переменном токе потери на гистерезис и вихревые токи). Точность ферродинамических приборов меньше, чем электродинамических приборов. Благодаря большому вращающему моменту приборы этой системы часто применяются в качестве самопишущих приборов. Стрелка этих приборов снабжена пером, лежащим на бумажной ленте, которая перемещается при помощи часового механизма. Стрелка с пером чертит на бумаге кривую изменений тока, напряжения, мощности и т. п.

§ 165. Тепловые измерительные приборы

Принцип действия тепловых приборов основан на удлинении металлической нити при нагревании ее током, которое затем преобразуется во вращательное движение подвижной части прибора. На фиг. 332 показано устройство теплового прибора. Между точками A_1 и A_2 натянута металлическая нить *1* длиной 100—160 *мм*, диаметром 0,03—0,05 *мм*, изготовленная из сплава платины с иридием (или с серебром). В точке *Б* платиноиридиевую нить оттягивает другая металлическая нить *2* (мостик), закрепленная другим своим концом неподвижно в точке *В*. Мостик в точке *Г* оттягивается тонкой шелковой нитью *3*, которая, обвивая ролик *4*, другим концом крепится к плоской стальной пружине *5*. Ток, проходя по платиноиридиевой нити, нагревает ее (в некоторых конструкциях до 300°). В результате линейного удлинения нити *1* смещаются металлическая нить *2*, шелковая

нить *3* и пружина *5*. На фиг. 332 пунктиром показано положение отдельных частей прибора после удлинения платиноиридиевой нити. Количество тепла, выделяемое током, пропорционально квадрату тока и сопротивлению нити (I^2r). Не принимая во внимание некоторое изменение сопротивления нити при нагревании, можно предположить, что нагрев нити пропорционален квадрату тока. Следовательно, шкала теплового прибора неравномерна. Тепловой прибор может работать в цепях постоянного и переменного тока, причем в последнем случае прибор будет показывать действующее значение измеряемой величины.

Поскольку в работе прибора не участвуют магнитные поля, на его показания не влияют внешние магнитные поля. Отсутствие железа и ничтожная индуктивность короткой нити обеспечивают независимость показаний теплового прибора от изменений частоты тока в широких пределах. Этим обстоятельством объясняется широкое применение приборов этого типа в цепях с повышенной и высокой частотой. Успокоение прибора чаще всего бывает электромагнитное. Для этой цели на оси прибора находится алюминиевая пластинка *7*, расположенная между полюсами сильного подковообразного магнита *8*. При поворачивании оси пластинка *7* пересекает магнитное поле и в ней индуктируются вихревые токи, которые, взаимодействуя с полем магнита, быстро успокаивают подвижную часть прибора.



Фиг. 332. Устройство прибора тепловой системы

Но одновременно с положительными качествами тепловые приборы обладают целым рядом недостатков. Наиболее существенным из них является зависимость показаний прибора от внешней температуры. Для уменьшения такого влияния плита *9*, на которой крепятся все части прибора, изготовляется из двух различных металлов, имеющих тот же коэффициент теплового расширения, что и платиноиридиевая нить, благодаря чему при действии внешней температуры плита и нить расширяются одинаково и натяжение нити остается без изменений. Имеются и другие способы компенсации влияния внешней температуры. Тепловые приборы боятся перегрузки, так как в этом случае нить перегорает или получает остаточную деформацию, после чего шкалу прибора приходится градуировать заново.

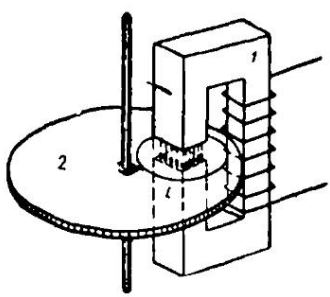
Расход мощности очень велик и достигает у амперметров на

5 *а* 1—3 *вт*, у вольтметров на 150 *в* 20—30 *вт*. Точность приборов невелика и отклонения достигают 1,5—2%. Нужно, однако, отметить, что в настоящее время тепловые приборы сняты с производства и заменены термоэлектрическими с воздушными или вакуумными преобразователями. Последние имеют ряд преимуществ по сравнению с тепловыми и удовлетворяют требованиям ГОСТ (см. § 167).

§ 166. Индукционные измерительные приборы

Эта система характеризуется применением нескольких неподвижных катушек, питаемых переменным током и создающих вращающееся или бегущее магнитное поле, которое индуктирует токи в подвижной части прибора и вызывает ее движение.

Индукционные приборы применяются только при переменном токе в качестве ваттметров и счетчиков электрической энергии (реже амперметров и вольтметров). Ознакомимся с теорией индукционных приборов. Следует отметить, что в настоящее время индукционные ваттметры заводами электроизмерительных приборов не выпускаются. Они заменены ферродинамическими ваттметрами, удовлетворяющими требованиям ГОСТ; показания последних меньше зависят от температуры и частоты. На фиг. 333 показан электромагнит *1* и алюминиевый диск *2*, могущий поворачиваться на оси. Проходящий по обмотке электромагнита переменный ток создает переменный магнитный поток, индуктирующий в алюминиевом диске э. д. с.



Фиг. 333. Наведение в диске вихревых токов переменным магнитным потоком

Из § 86 известно, что индуктированная э. д. с. отстает по фазе на 90° от магнитного потока Φ_1, создающего эту э. д. с. Ток i_1, возникший в алюминиевом диске, совпадает с э. д. с. по фазе и также отстает от магнитного потока Φ_1 на 90°. Ток i_1, взаимодействуя с магнитным потоком Φ_1, может создать силу, под действием которой диск будет поворачиваться. Но в данном случае этого не произойдет (см. фиг. 334, *а*).

Сила взаимодействия F, пропорциональная току i_1 и магнитному потоку Φ_1, меняя четыре раза в течение периода свое направление, не даст возможности диску поворачиваться. Если над диском расположить рядом второй электромагнит, то его магнитный поток Φ_2 создаст в диске индуктированный ток i_2. Если добиться того, чтобы потоки Φ_1 и Φ_2 были сдвинуты по фазе, то и токи i_1 и i_2 окажутся сдвинутыми по фазе и угол между Φ_1 и i_2 или Φ_2 и i_1 уже не будет 90°. Из фиг. 334, *б* видно, что в этом

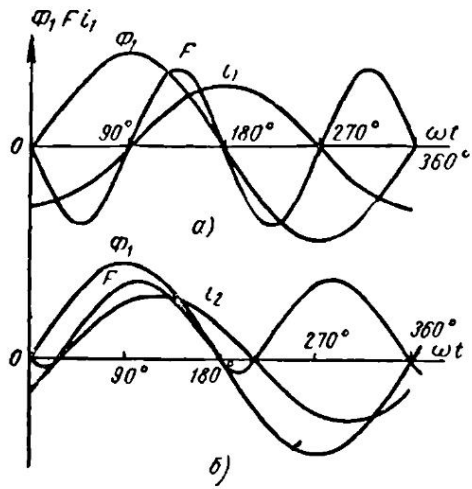
случае сила взаимодействия будет преобладать в каком-то одном направлении, в результате чего диск будет вращаться. Если потоки Φ_1 и Φ_2 будут сдвинуты по фазе на 90°, то сила, действующая на диск, будет наибольшей.

Индукционные приборы делятся на две группы: приборы с бегущим и приборы с вращающимся магнитным полем.

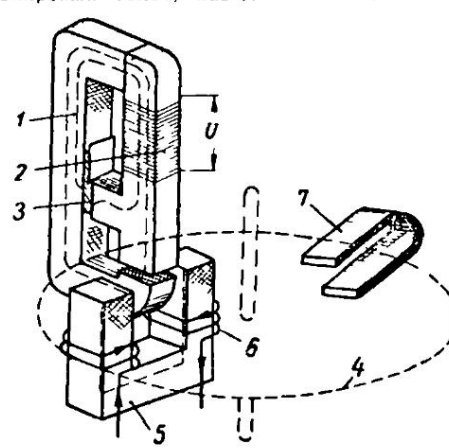
Рассмотрим устройство и работу индукционного прибора с бегущим полем (фиг. 335).

На магнитопроводе *1* располагается катушка *2*, состоящая из большого числа витков тонкой проволоки. Магнитный поток, создаваемый этой катушкой, большей своей частью проходит через магнитный шунт *3*, а остальная часть пронизывает алюминиевый диск *4*. Под диском помещается *U*-образный магнитопровод *5*, на котором располагают обмотку *6*, разделенную на две части и намотанную из нескольких витков толстой проволоки. Магнитный поток этой обмотки дважды пронизывает диск. Два магнитных потока, сдвинутых по фазе друг относительно друга, индуктируют в алюминиевом диске вихревые токи, которые, взаимодействуя с потоками, создают вращающий момент, под влиянием которого диск приходит в движение.

Успокоение диска производится подковообразным магнитом *7*.



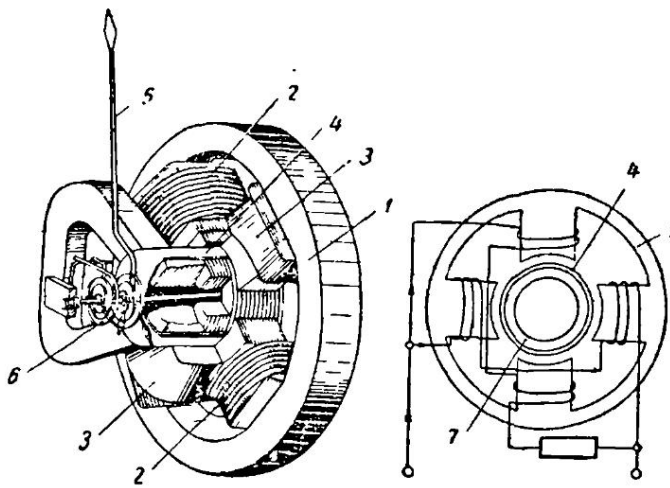
Фиг. 334. Кривые магнитных потоков и вихревых токов, наведенных в диске



Фиг. 335. Принципиальная схема индукционного прибора с бегущим полем

На фиг. 336 показано устройство индукционного прибора с вращающимся магнитным полем. На магнитопровод *1*, собранный из отдельных листов электротехнической стали, наматываются две обмотки, причем одна обмотка *2* располагается на двух

противоположных полюсных выступах магнитопровода, а другая *3* — на двух других также противоположных выступах. Между полюсами на оси находится алюминиевый цилиндр *4*. На оси крепятся также стрелка *5* и спиральная пружина *6*. Внутри алюминиевого цилиндра помещен цилиндрический стальной сердечник *7*, назначением которого является уменьшение магнитного сопротивления. При пропускании переменного тока обмотки *2* и *3* создают два магнитных потока.



Фиг. 336. Индукционный прибор с вращающимся магнитным полем

Выше было сказано, что для получения наибольшего момента вращения необходимо создать между магнитными потоками сдвиг, по фазе равный 90°. Это достигается тем, что одну пару катушек наматывают из небольшого числа витков толстой проволоки. Такая обмотка представляет активное сопротивление, и ток в ней совпадает по фазе с напряжением. Другая пара катушек наматывается из большого числа витков тонкой проволоки, что вызывает между током и напряжением сдвиг, близкий к 90°, вследствие большого индуктивного сопротивления этой пары катушек. Сдвиг по фазе между потоками можно получить также путем подбора и включения дополнительных активных и индуктивных сопротивлений. Перемещающееся по окружности воздушного зазора магнитное поле будет тем самым вращаться с определенной скоростью относительно оси подвижной системы прибора. Это поле, пересекая алюминиевый цилиндр *4*, будет индуктировать в нем вихревые токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем, будут поворачивать цилиндр в сторону вращения поля. Из рассмотрения принципа

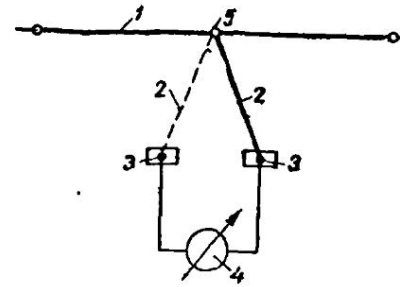
действия индукционных приборов с вращающимся магнитным полем видно, что они работают на том же принципе, как и двухфазные асинхронные короткозамкнутые двигатели.

Успокоение прибора осуществляется за счет вихревых токов, индуктируемых в верхних частях алюминиевого цилиндра при движении его в поле двух постоянных магнитов (один из них на чертеже не показан). Внешние магнитные поля не оказывают влияния на работу индукционных приборов в виду наличия в них сильного собственного магнитного поля. Достоинствами индукционных приборов являются также прочность конструкции, стойкость к перегрузкам, надежность в работе. Недостатками индукционных приборов являются: пригодность их только для переменного тока, неравномерность шкалы, зависимость показаний от температуры и частоты, малая точность (1,0—1,5%). Расход мощности в индукционных приборах составляет 2—4 *вт*.

§ 167. Приборы термоэлектрической системы

Принцип действия приборов термоэлектрической системы основан на использовании электродвижущей силы, возникающей в цепи, состоящей из разнородных проводников, если место соединения этих проводников имеет температуру, отличную от температуры остальной части цепи.

На фиг. 337 дана схема прибора термоэлектрической системы. Измеряемый ток проходит по металлической нити *1*, к которой припаяны или приварены два разнородных проводника *2*, например железо и константан. Свободные концы проводников *2* присоединены к металлическим колодкам *3*, хорошо отводящим тепло. К колодкам подключается магнитоэлектрический измерительный прибор *4*.



Фиг. 337. Схема прибора термоэлектрической системы

Когда по нити *1* проходит ток, сама нить и место спая ее с проводниками *2* (точка *5*) нагреваются. Точка *5* представляет собой горячий спай термопары. Металлические колодки *3* являются холодными спаями термопары. Вследствие разности температур в замкнутом контуре возникает термо-э. д. с., которая создает в этой цепи ток. Направление термотока будет всегда одно и то же, независимо от направления измеряемого тока.

Количество тепла, выделенного в горячем спае термопары, согласно закону Джоуля — Ленца, пропорционально квадрату

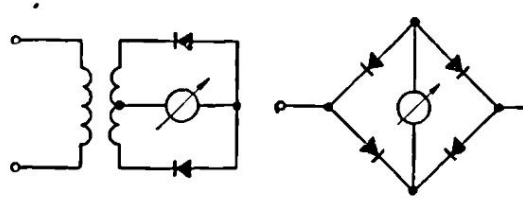
тока. Поэтому шкала применяемого в этой системе магнитоэлектрического прибора неравномерна. Для получения равномерной шкалы магнитное поле магнитоэлектрического прибора делают неоднородным. Термо-э. д. с. одной термопары не превышает 15 *мв*, что требует установки весьма чувствительного магнитоэлектрического прибора. Чтобы увеличить величину термо-э. д. с., соединяют несколько термопар последовательно в термобатарею.

Чувствительные термоэлектрические приборы изготовляются с термопарой, помещенной в вакуум.

Приборы термоэлектрической системы чувствительны к перегрузкам: даже при кратковременной перегрузке на 10% нагревательная нить может перегореть. Точность приборов довольно высока, что дает возможность строить их в классах 0,5 и 1. Приборы термоэлектрической системы получили наибольшее применение для измерения малых значений переменных токов в цепях повышенной и высокой частоты.

§ 168. Приборы детекторной системы

Приборы детекторной системы представляют собой сочетание магнитоэлектрического измерительного прибора и одного или нескольких полупроводниковых выпрямителей (детекторов), соединенных вместе в одну схему. В качестве выпрямителей (детекторов) обычно используют медноокисные выпрямители.

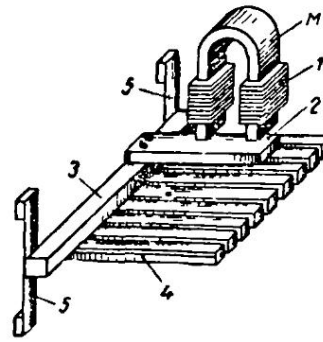


Фиг. 338. Схема соединений детектора с магнитоэлектрическим прибором

На фиг. 338 даны схемы соединения детекторов с магнитоэлектрическим прибором. Приборы этой системы применяются для измерения небольших величин переменного тока и напряжения (начиная от десятых долей миллиампера и десятых долей вольта), а также для измерения в цепях повышенной частоты (50—2000 *гц*). Применяются главным образом универсальные приборы: многопредельные вольтамперметры постоянного и переменного тока. Точность приборов детекторной системы невелика: они изготовляются обычно в классе 2,5.

§ 169. Приборы вибрационной системы

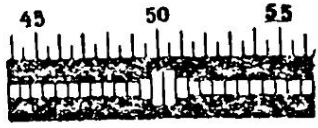
Эта система характеризуется применением ряда настроенных пластин, имеющих разные периоды собственных колебаний и позволяющих производить измерение частоты благодаря резонансу частоты колеблющейся пластины с измеряемой частотой. Вибрационные приборы строятся только в качестве частотомеров. На фиг. 339 показано устройство вибрационного частотомера.



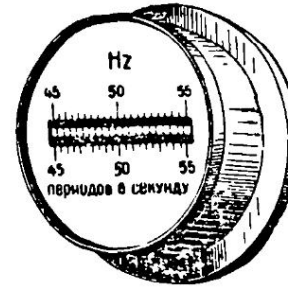
Фиг. 339. Схема устройства частотомера

Электромагнит, обмотка *1* которого питается от сети переменного тока, расположен над стальной пластиной (якорем) *2*, укрепленной на металлической планке *3*. На планке расположен ряд стальных язычков *4*, настроенных на разные периоды собственных колебаний. Сама планка привернута к плоским пружинам *5*. Концы язычков загнуты и окрашены белой краской. При прохождении по обмотке электромагнита переменного тока создается переменный магнитный поток, который, действуя на якорь *2*, заставляет его колебаться. Это колебательное движение будет передаваться планке *3* и язычкам *4*.

Хотя все язычки приходят в колебание, но наибольший размах будет совершать тот язычок, у которого собственный период



Фиг. 340. Часть шкалы вибрационного частотомера



Фиг. 341. Общий вид вибрационного частотомера

колебания совпал с частотой изменения магнитного потока или, другими словами, совпал с частотой переменного тока. В прямоугольном вырезе шкалы частотомера видны окрашенные концы язычков. Против каждого язычка на шкале прибора стоит цифра, соответствующая частоте тока в герцах. При работе при-

бора окрашенный конец резонирующего язычка образует размытую светлую полосу.

Часть шкалы вибрационного частотомера показана на фиг. 340.

Система прибора	Знак системы	
	без экрана	с магнитным экраном
Магнитоэлектрическая, с механической противодействующей силой		
То же, без противодействующей силы		
Электромагнитная, с противодействующей силой		
То же, без противодействующей силы		
Электродинамическая, с противодействующей силой		
То же без противодействующей силы		
Ферродинамическая, с противодействующей силой		
То же, без противодействующей силы		
Индукционная с противодействующей силой		—
То же без противодействующей силы		—
Тепловая		—
Термоэлектрическая		—
Детекторная		—
Электронная		—
Электростатическая		—
Вибрационная		—

Объект обозначения	Условный знак
Постоянный ток	
Переменный ток	
Постоянный и переменный ток	
Трехфазный ток	
равномерная нагрузка.	
неравномерная нагрузка.	
четырехпроводная система	
Частота 50 гц	~ 50
Изоляция прибора испытана на 2 кв	
Вертикальное положение шкалы	
Горизонтальное положение шкалы	
Наклонное положение шкалы (например под углом 60°)	∠60°
Класс прибора (например 0,2)	0,2

Фиг. 342. Условные обозначения, помещаемые на шкалах электроизмерительных приборов

Общий вид вибрационного частотомера дан на фиг. 341.

Обмотка электромагнита частотомера состоит из большого числа витков тонкой проволоки и включается в сеть параллельно, так же как обмотка вольтметра.

Заканчивая рассмотрение различных систем электроизмерительных приборов, приводим условные обозначения, помещаемые на шкалах приборов (фиг. 342).

Следует отметить, что вибрационные частотомеры в настоящее время применяют мало, их заменяют стрелочные частотомеры, имеющие непрерывную шкалу и удовлетворяющие требованиям ГОСТ.

§ 170. Измерительные трансформаторы

В сетях переменного тока для отделения измерительных приборов в целях безопасности от проводов высокого напряжения, а также для расширения пределов измерения приборов применяются измерительные трансформаторы напряжения и тока.

Для обеспечения высокой точности измерений трансформаторы напряжения (тока) не должны менять свой коэффициент трансформации и иметь постоянный угол в 180° между векторами первичного и вторичного напряжения (тока). Последнее условие необходимо при включении через трансформаторы напряжения (тока) таких приборов, показания которых зависят от угла сдвига между напряжением и током сети (например, ваттметры, счетчики, фазометры и др.).

Однако на практике трансформаторы напряжения (тока) имеют так называемую погрешность в коэффициенте трансформации и угловую погрешность.

Номинальным коэффициентом трансформации трансформатора напряжения $k_н$ (тока $k_т$) называется отношение номинальной величины первичного напряжения (тока) к номинальной величине вторичного напряжения (тока).

Относительной погрешностью в коэффициенте трансформации называется разность между вторичным напряжением (током), умноженным на коэффициент трансформации, и действительной величиной первичного напряжения (тока), отнесенная к действительной величине первичного напряжения (тока):

$$\gamma_U = \frac{k_н U_2 - U_1}{U_1}; \quad \gamma_I = \frac{k_т I_2 - I_1}{I_1}.$$

Угловой погрешностью измерительного трансформатора напряжения (тока) называется угол между вектором первичного напряжения (тока) и повернутым на 180° вектором вторичного напряжения (тока).

Погрешность в коэффициенте трансформации и угловая погрешность увеличиваются с нагрузкой. Поэтому трансформато-

ры нельзя нагружать сверх номинальной (указанной на паспорте) мощности.

Трансформаторы, выпускаемые в СССР в пределах номинальной мощности, могут иметь ошибку в коэффициенте трансформации до ±1% и угловую погрешность ±45′.

§ 171. Измерительные трансформаторы напряжения

Первичная и вторичная обмотки измерительного трансформатора напряжения выполняются из медной изолированной проволоки и надеваются на замкнутый сердечник, собранный из отдельных листов трансформаторной стали. Трансформатор для питания ламп накаливания, электродвигателей и т. п. (силовой трансформатор) по своему устройству принципиально не отличается от устройства трансформатора напряжения, служащего для питания цепей напряжения электроизмерительных приборов.

Номинальный коэффициент трансформации обычно указывается на паспорте трансформатора в виде дроби, в числителе которой указывается напряжение первичной обмотки, в знаменателе — напряжение вторичной обмотки, например 6000/100, т. е. $k_н$ в этом случае будет равен 60.

Согласно ГОСТ 1983—43 все трансформаторы напряжения, выпускаемые в СССР, имеют вторичное напряжение 100 *в*. Номинальные мощности трансформаторов напряжения 200—2000 *ва*.

Зная коэффициент трансформации трансформатора и напряжение вторичной обмотки, можно определить первичное напряжение:

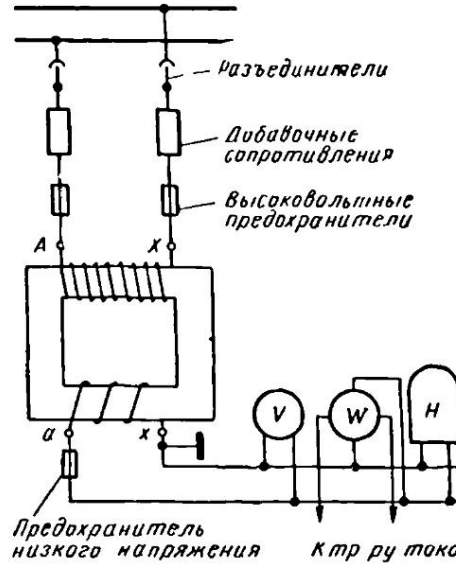
$$U_1 = k_н U_2.$$

Для приборов, работающих постоянно с одним и тем же трансформатором, шкала градуируется с учетом коэффициента трансформации на первичное напряжение.

На паспорте трансформатора указывается номинальная мощность. Во избежание ошибок при измерениях к трансформатору необходимо подключать такое количество приборов, при котором потребляемая приборами мощность в сумме не была бы выше номинальной мощности трансформатора.

Трансформаторы напряжения изготовляются однофазными и трехфазными. На фиг. 343 показана схема включения однофазного измерительного трансформатора напряжения. Для защиты трансформатора от перегрузок и коротких замыканий в цепи измерительных приборов во вторичную обмотку включается низковольтный плавкий предохранитель. В случае пробоя изоляции высоковольтной обмотки сердечник и вторичная обмотка могут получить высокий потенциал. Во избежание этого вторичная обмотка и металлические части трансформатора заземляются. Пре-

дохранитель в заземленный конец вторичной обмотки не включается. Для защиты высоковольтной сети от последствий короткого замыкания в первичной обмотке трансформатора она включается в сеть через высоковольтные предохранители. В целях облегчения работы высоковольтных предохранителей последовательно с ними включаются дополнительные токоограничивающие сопротивления, которые, уменьшая величину тока короткого замыкания, обеспечивают надежную работу предохранителей. Для отключения трансформатора от сети служат разъединители.



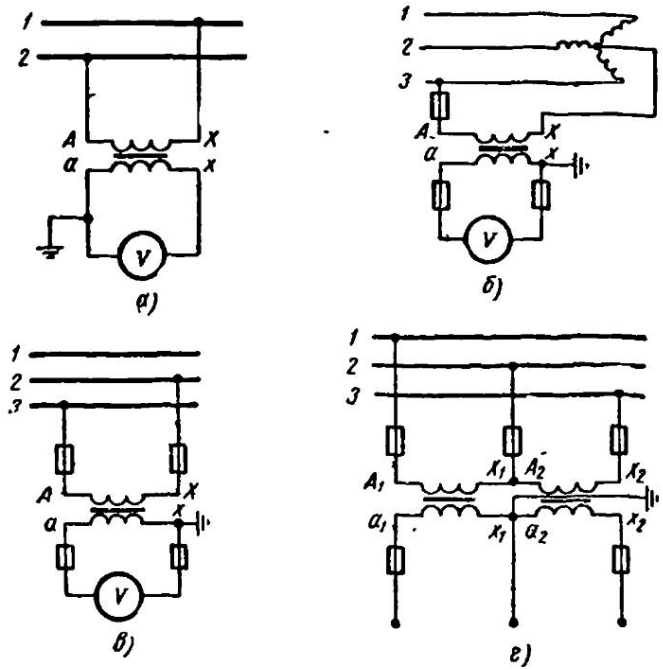
Фиг. 343. Схема включения однофазного измерительного трансформатора напряжения

Трансформаторы напряжения делятся на четыре класса точности: 0,2; 0,5; 1 и 3. Цифры означают процент погрешности по напряжению. При напряжении до 3 *кв* трансформаторы выполняются с сухим (воздушным) охлаждением, свыше 6 *кв* — с масляным охлаждением.

Трансформаторы напряжения служат: для измерения напряжения в высоковольтных сетях; для присоединения реле напряжения, катушек нулевого напряжения ручных и автоматических приводов, частотомеров, сигнальных ламп; для питания параллельных обмоток ваттметров, счетчиков, фазометров; для контроля изоляции. На фиг. 344 показано применение измерительных трансформаторов напряжения: *а* — измерение напряжения в сети однофазного тока; *б* — измерение фазного напряжения в сети трехфазного тока; *в* — измерение линейного напряжения в сети трехфазного тока; *г* — включение двух однофазных трансформаторов напряжения по схеме «открытый треугольник», позволяющей измерить все три линейных напряжения. В сетях трехфазного тока применяются также трехфазные измерительные трансформаторы напряжения. Схема включения такого трансформатора изображена на фиг. 345.

На фиг. 346 показан внешний вид однофазного трансформатора напряжения НКФ-220 (высота 3,75 *м*, полный вес 2640 *кг*).

На фиг. 347 показаны примеры применения трансформаторов напряжения для контроля состояния изоляции сети: *а* — контроль состояния изоляции линии однофазного тока по отношению к «земле». При исправном состоянии изоляции каждый из вольтметров покажет половину напряжения сети. При замыкании одного провода на «землю» вольтметр, подключенный между этим проводом и «землей», покажет нуль, а другой вольт-

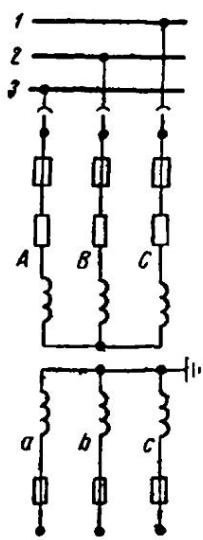


Фиг. 344. Применение однофазных измерительных трансформаторов напряжения:

а — измерение напряжения в сети однофазного тока, *б* — измерение фазного напряжения в сети трехфазного тока, *в* — измерение линейного напряжения в сети трехфазного тока, *г* — включение двух однофазных трансформаторов напряжения по схеме «открытый треугольник»

метр — полное напряжение сети; *б* — контроль состояния изоляции сети трехфазного тока. При исправном состоянии изоляции каждый из вольтметров покажет фазное напряжение. При замыкании одного провода на «землю» вольтметр, присоединенный к этому проводу, покажет нуль, а для других — линейное напряжение. Если использовать для этой цели трехфазный трехстержневой трансформатор с заземленной нулевой точкой на высоковольтной стороне, то в случае заземления в сети одна из обмоток трансформатора окажется замкнутой накоротко, две же

другие обмотки будут индуктировать в ней большой ток, что может привести к порче трансформатора. Во избежание этого трехфазные трехстержневые трансформаторы изготовляют без выведенной нулевой точки на высоковольтной стороне; *в* — трехфазный пятистержневой трансформатор, применяемый в сетях трехфазного тока для контроля изоляции. При исправном состоянии сети геометрическая сумма магнитных потоков равна нулю и в крайних стержнях магнитный поток не проходит. При заземлении одного из проводов высоковольтной сети соответствующая обмотка трансформатора окажется замкнутой, магнитные потоки остальных фаз станут замыкаться через крайние стержни и наводить э. д. с. во вспомогательной обмотке. Трансформаторы напряжения делятся на три группы:

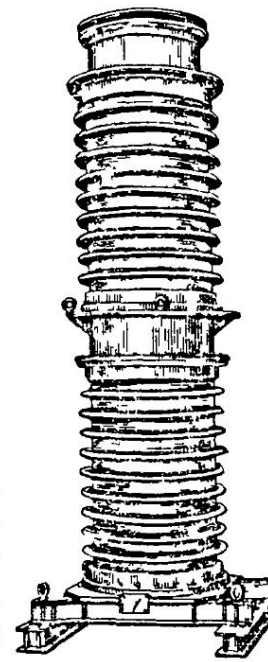


Фиг. 345. Схема включения трехфазного измерительного трансформатора напряжения

1. Сухие трансформаторы типа НОС-0,5, НОС-3, НТС-0,5 и НТСН-0,5.

2. Масляные трансформаторы типа НОМ-10; НОМ-35; НТМК-6; НТМК-10; НТМИ-6 и НТМИ-10.

3. Каскадные масляные трансформаторы типа НКФ-110, НКФ-220.



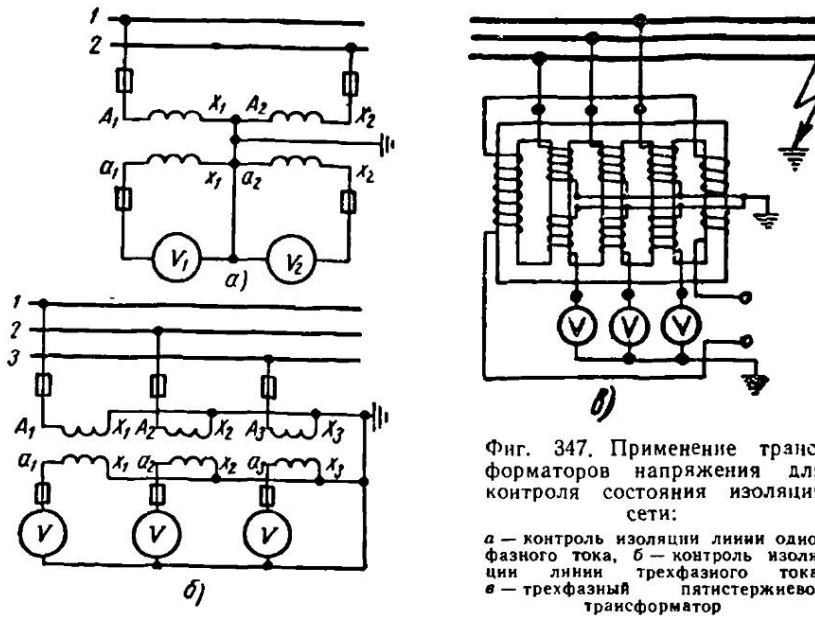
Фиг. 346. Трансформатор напряжения НКФ-220

Буквенные обозначения, применяемые для наименования трансформаторов напряжения: НОС—трансформатор напряжения однофазный сухой; НТС — трансформатор напряжения трехфазный сухой; НТСИ — трансформатор напряжения трехфазный трехобмоточный пятистержневой сухой для контроля изоляции; НОМ — трансформатор напряжения однофазный масляный; НТМК — трансформатор напряжения трехфазный масляный с компенсирующей обмоткой; НТМИ — трансформатор напряжения трехфазный трехобмоточный масляный пятистержневой для контроля изоляции; НКФ — трансформатор напряжения однофазный каскадный в фарфоровом кожухе. Цифра, следующая

после буквенного обозначения, показывает высшее номинальное напряжение данного типа трансформатора в киловольтах.

Трансформаторы напряжения предназначены для внутренней установки, кроме НОМ-35, НКФ-110 и НКФ-220, которые предназначены для наружной установки.

У трехфазных трехстержневых трансформаторов НТМК основные витки данной фазы первичной обмотки соединяются с небольшим количеством компенсирующих витков другой фазы.



Фиг. 347. Применение трансформаторов напряжения для контроля состояния изоляции сети:

а — контроль изоляции линии однофазного тока, *б* — контроль изоляции линии трехфазного тока, *в* — трехфазный пятистержневой трансформатор

Такое соединение дает возможность снижать (компенсировать) угловую погрешность трансформатора и тем самым повышать его точность. Каскадные трансформаторы состоят из нескольких трансформаторов, причем вторичная обмотка предыдущего трансформатора дает напряжение на первичную обмотку следующего.

§ 172. Измерительные трансформаторы тока

Трансформаторы тока служат для преобразования тока большой величины в ток малой величины. На фиг. 348 показаны устройство и схема включения трансформатора тока. На сердечник, собранный из отдельных листов трансформаторной стали,

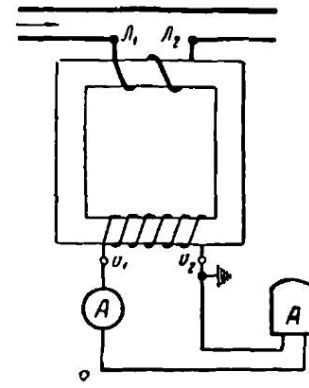
наматываются две обмотки: первичная, состоящая из небольшого количества витков, включаемая последовательно в цепь, по которой проходит измеряемый ток, и вторичная, состоящая из большого числа витков, к которой подключены измерительные приборы. При измерении тока в сетях высокого напряжения измерительные приборы оказываются отделенными и изолированными от высоковольтных проводов. Вторичная обмотка трансформатора тока выполняется обычно на ток 5 *а* (иногда на 10 *а*), первичные номинальные токи могут быть от 5 до 15 000 *а*.

Отношение первичного тока к вторичному, равное приближенно обратному отношению витков обмоток, называется коэффициентом трансформации трансформатора тока. Номинальный коэффициент трансформации указывается на паспорте трансформатора в виде дроби, в числителе которой указывается номинальный первичный ток, а в знаменателе — номинальный вторичный ток, например 150/5 *а*, т. е. $k_т = 30$.

Зная вторичный ток I_2 и коэффициент трансформации трансформатора тока $k_т$, можно определить первичный ток I_1:

$$I_1 = k_т I_2.$$

Приборы, постоянно работающие с одним трансформатором, градуируются на первичный ток с учетом коэффициента трансформации. Применение трансформатора для измерения тока вносит неизбежные погрешности (до ±1%).



Фиг. 348. Схема включения измерительного трансформатора тока

Напомним, что в трансформаторе напряжения результирующий магнитный поток при любом режиме работы остается почти постоянным. Если же в трансформаторе тока при неизменном первичном токе увеличивать сопротивление в цепи вторичной обмотки, то это приведет к уменьшению тока I_2 и потока $Ф_2$, что, в свою очередь, вызовет увеличение результирующего потока Ф. При размыкании вторичной обмотки ($I_2=0$, $Ф_2=0$) результирующий магнитный поток в сердечнике трансформатора увеличится до величины потока $Ф_1$. Сердечник, рассчитанный на результирующий поток Ф, в этом случае станет перегреваться, что может привести к порче трансформатора. Кроме того, увеличенный против обычного магнитный поток будет индуктировать во вторичной обмотке значительную э. д. с. (500—1000 *в*), опасную при случайном прикосновении к ее зажимам. Поэтому при протекании тока по первичной обмот-

ке размыкать вторичную обмотку нельзя; она должна быть всегда замкнута на приборы или накоротко.

При увеличении сопротивления вторичной цепи возрастает результирующий магнитный поток, сердечник трансформатора насыщается, что приводит к увеличению погрешностей трансформатора.

Подключая к трансформатору тока измерительные приборы, необходимо следить, чтобы мощность, потребляемая приборами, не превышала номинальной мощности трансформатора. Если, например, мощность трансформатора равна 20 *ва*, то при вторичном токе в 5 *а* сопротивление вторичной цепи должно быть не более

$$r = \frac{P}{I_2^2} = \frac{20}{25} = 9{,}8 \text{ } ом.$$

При подсчетах необходимо учитывать сопротивление проводов. Допускаемая нагрузка трансформаторов тока лежит в пределах 15—75 *ва*.

У трансформаторов тока один конец вторичной обмотки и кожух заземляются с той же целью, что и у трансформаторов напряжения. Трансформаторы тока делятся по различным признакам.

По роду установки—на трансформаторы для внутренних или наружных установок. По роду изоляции — на трансформаторы сухие с фарфоровой или бумажной изоляцией, с заполнением маслом, с заполнением компаундной массой. По конструктивному выполнению трансформаторы делятся на катушечные, проходные, шинные, встроенные во втулки масляных выключателей, фарфоровые с поперечным отверстием, горшковые и опорные. По числу вторичных цепей трансформаторы делятся на однообмоточные и двухобмоточные. В последнем случае трансформатор имеет две вторичные обмотки, намотанные на два сердечника. Такой трансформатор служит для питания двух раздельных вторичных цепей: например от одной обмотки могут питаться измерительные приборы, а от другой — реле.

По числу витков первичной обмотки трансформаторы делятся на одновитковые и многовитковые.

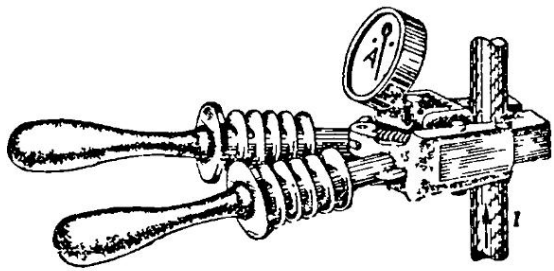
По степени точности трансформаторы тока делятся на пять классов: 0,2; 0,5; 1; 3 и 10. Цифры обозначают погрешность в коэффициенте трансформации в процентах.

В зависимости от назначения трансформаторы делятся на стационарные (устанавливаемые на одном месте) и переносные. Последние изготовляются с несколькими (до 28) коэффициентами трансформации.

Своеобразным трансформатором тока являются измерительные клещи (фиг. 349). Разъемный стальной сердечник при помощи изолирующих ручек может раздвигаться и охватывать провод или шину. Амперметр, укрепленный на клещах, приключен

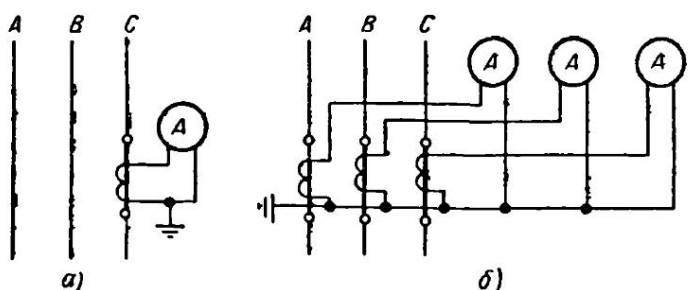
к концам вторичной обмотки, намотанной на сердечник. Первичной обмоткой является провод или шина с измеряемым током.

Трансформаторы тока служат для включения амперметров, последовательных обмоток ваттметров, счетчиков, фазометров, токовых реле и т. п.



Фиг. 349. Измерительные клещи

На фиг. 350 показано применение трансформаторов тока: *а* — измерение тока при равномерной нагрузке фаз; *б* — измерение тока при неравномерной нагрузке фаз.



Фиг. 350. Применение трансформаторов тока для измерения тока: *а* — при равномерной нагрузке, *б* — при неравномерной нагрузке

Расшифровка обозначений, применяемых для трансформаторов тока:

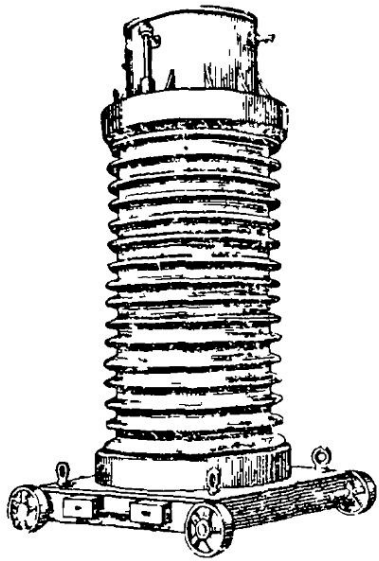
Т — трансформатор тока.
П — проходной.
Ш — шинный.
У — усиленный.
Ф — фарфоровая изоляция между первичной и вторичной обмотками.
Д — сердечник в специальном исполнении для дифференциальной защиты.
З — имеет сердечник в специальном исполнении для защиты от замыкания на «землю».

Р — разъемный сердечник.
О — одновитковый (первичная обмотка — медный стержень).
К — катушечный.
В — встроенный в выключатель.
М — модернизированный.
Б — быстронасыщающийся.

После наименования первая цифра означает напряжение (*кв*), вторая (одна или две) означает число вторичных обмоток и их класс точности.

Например, ТПФУД-10-0,5/Д означает: трансформатор тока проходной с фарфоровой изоляцией усиленного исполнения на 10 *кв* с двумя обмотками, одна — класса точности 0,5, вторая — для дифференциальной защиты.

На фиг. 351 показан внешний вид трансформатора тока ТФНД-220 (номинальное напряжение 220 *кв*, высота 3770 *мм*, вес с маслом 4400 *кг*).



Фиг. 351. Трансформатор тока ТФНД-220

§ 173. Измерение тока в цепи

Для измерения тока в цепи служат амперметры, включаемые последовательно в цепь, где производится определение величины тока. Чтобы ток в цепи при включении амперметра не изменился, необходимо сопротивление его обмотки делать очень малым. Для этого обмотку амперметра делают из небольшого числа витков толстой проволоки. Чтобы расширить пределы измерения амперметра, применяют шунты. Шунты представляют собой манганиновые пластины или стержни, впаянные в медные или латунные наконечники (фиг. 352). Шунт включается в цепь последовательно. Параллельно ему включается амперметр (фиг. 353). Ток цепи I в точке A разветвляется обратно пропорционально сопротивлениям обмотки амперметра $r_а$ и шунта $r_ш$:

$$\frac{I_а}{I_ш} = \frac{r_ш}{r_а}, \text{ причем } I_ш = I - I_а,$$

откуда сопротивление шунта будет:

$$r_ш = \frac{I_а r_а}{I - I_а}.$$

Обозначим отношение тока I к току $I_а$ через n (число n иногда называют коэффициентом шунтирования). Тогда выражение для $r_ш$ можно записать так:

$$r_ш = \frac{r_а}{n-1}.$$

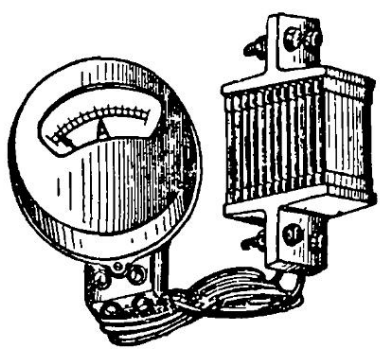
Пример 1 Определить сопротивление шунта к амперметру на 5 *а* с внутренним сопротивлением 0.006 *ом*, необходимого для измерения тока 20 *а*.

$I_а = 5$ *а*
$r_а = 0{,}006$ *ом*
I 20 *а*

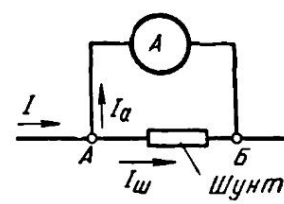
$$n = \frac{20}{5} = 4$$

$$r_ш = \frac{r_а}{n-1} = \frac{0{,}006}{3} = 0{,}002 \text{ ом}.$$

На токи до 100 *а* шунты помещают внутри прибора (внутренние шунты). На большие токи шунты делаются наружными и присоединяются к амперметрам при помощи проводов, сопро-



Фиг. 352. Амперметр с шунтом



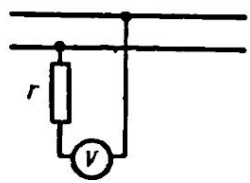
Фиг. 353. Схема включения амперметра с шунтом

тивление которых точно выверено, так как иначе распределение токов будет другим и измерение неправильным. Встречаются универсальные шунты на несколько пределов измерений. Приборы, которые постоянно работают со своим индивидуальным шунтом, градуируются с учетом шунта, о чем делается надпись на шкале прибора. Часто применяются также калиброванные шунты. Такой шунт можно включать с любым прибором, рассчитанным на ту же величину падения напряжения, что и данный шунт. Обычно шунты ставятся только к приборам магнитоэлектрической системы для измерений в цепях постоянного тока.

Для расширения пределов измерения амперметров в цепях переменного тока применяются трансформаторы тока.

§ 174. Измерение напряжения

Для измерения напряжения употребляются вольтметры. Вольтметры включаются параллельно тому участку цепи, где необходимо измерить напряжение. Чтобы прибор не потреблял большой ток и не влиял на величину напряжения цепи, обмотка его должна иметь большое сопротивление. Чем больше внутреннее сопротивление вольтметра, тем точнее он будет измерять величину напряжения. Для этого обмотка вольтметра изготовляется из большого числа витков тонкой проволоки.



Фиг. 354. Включение добавочного сопротивления к вольтметру

Для расширения пределов измерения вольтметров употребляются добавочные сопротивления, включаемые последовательно с вольтметрами (фиг. 354). В этом случае напряжение сети распределяется между вольтметром и добавочным сопротивлением. Величину добавочного сопротивления необходимо подбирать с таким расчетом, чтобы в цепи с увеличенным напряжением по обмотке вольтметра проходил тот же ток, что и при номинальном напряжении. Ток, на который рассчитана обмотка прибора:

$$I_в = \frac{U}{r_в} .$$

В цепи с напряжением в n раз большим ток вольтметра с добавочным сопротивлением r должен остаться прежним

$$I_в = \frac{nU}{r_в + r} \text{ или } \frac{U}{r_в} = \frac{nU}{r_в + r} ,$$

отсюда величина добавочного сопротивления равна:

$$r = r_в(n - 1).$$

Пример. 2. Вольтметром на 25 *в* необходимо измерить напряжение 150 *в*. Определить величину добавочного сопротивления, если внутреннее сопротивление вольтметра 1000 *ом*.

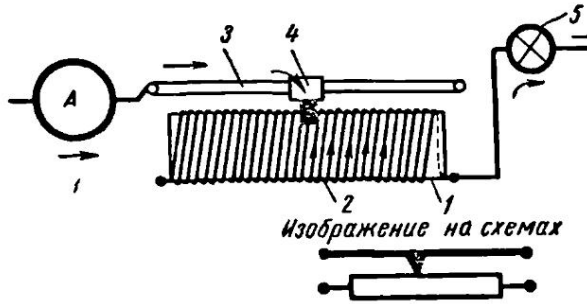
$$r_в = 1000 \text{ ом}$$
$$n = 150:25 = 6$$
$$r = r_в(n - 1) = 1000\,(6 - 1) = 5000 \text{ ом}.$$

Добавочные сопротивления изготовляются из манганиновой проволоки, намотанной на гетинаксовый или фарфоровый каркас. Добавочные сопротивления помещаются внутри прибора или отдельно от него. Для измерения высоких напряжений переменного тока употребляются измерительные трансформаторы напряжения.

§ 175. Реостаты

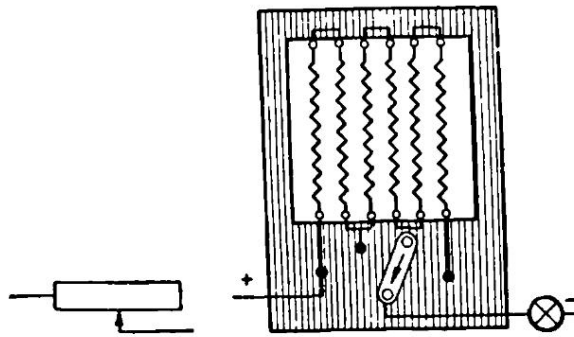
В электроизмерительной практике, а также при эксплуатации электрических машин применяются различные реостаты.

Реостатом называется прибор, обладающий некоторым сопротивлением, которое можно изменять, меняя тем самым ток и напряжение цепи. Реостаты бывают со скользящим контактом, рычажные, жидкостные, ламповые и штепсельные.



Фиг. 355. Реостат со скользящим контактом

Реостат со скользящим контактом (фиг. 355). На фарфоровую трубку *1* наматывается голая проволока *2*. В результате специальной обработки поверхность проволоки покрывается тонкой пленкой окиси, не проводящей ток. По металлической план-



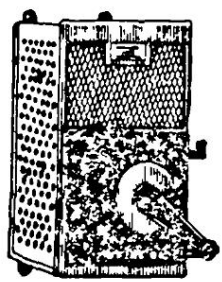
Фиг. 356. Рычажный реостат

ке *3*, прижимаясь к проволоке реостата, скользит ползунок *4*. Для положения ползунка, показанного на фиг. 355, путь прохождения электрического тока указан стрелками. Так как последовательно с электрической лампой *5* в цепь введена часть сопротивления реостата, то ток, протекающий через нить лампы, будет уменьшен и лампа в этом случае будет гореть слабее. Передвигая ползунок вправо, мы будем уменьшать сопро-

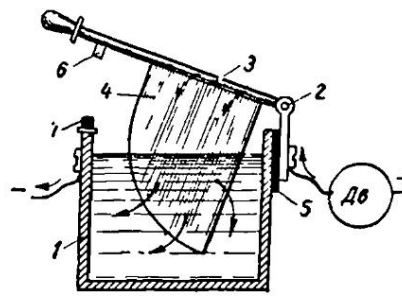
тивленне реостата, и сила света лампы будет увеличиваться. Реостаты со скользящим контактом применяются там, где необходимо плавное, медленное изменение тока в цепи.

Рычажный реостат (фиг. 356). На раме из изоляционного материала натягиваются спирали из проволоки. Спирали соединены последовательно. От начала, конца и мест соединений отдельных спиралей сделаны ответвления к контактам. Ставя рычаг на определенный контакт реостата, мы можем менять сопротивление, а вместе с этим и ток в цепи. Однако изменения эти происходят не плавно, а скачкообразно. Внешний вид рычажного реостата показан на фиг. 357.

Материалом для проволочных реостатов чаще всего служат железо, никелин, константан, манганин, нихром.



Фиг. 357. Внешний вид рычажного реостата



Фиг. 358. Жидкостный реостат

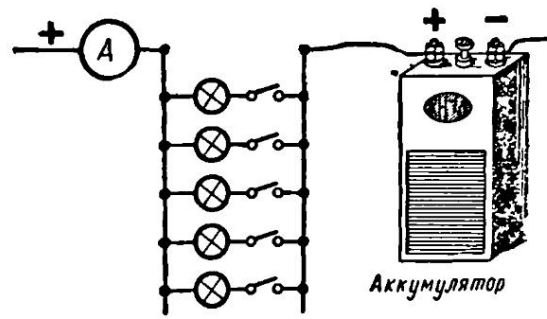
Жидкостный реостат (фиг. 358). Реостат представляет металлический сосуд *1* с раствором соды. На шарнире *2* укреплен рычаг *3*, на котором имеется железный или медный нож *4*. Рычаг с ножом изолирован от металлического ящика прокладкой *5*. Поднимая или опуская нож в раствор соды, можем менять ток в цепи. Опуская нож в раствор, мы увеличиваем площадь соприкосновения ножа с раствором и увеличиваем ток, проходящий через реостат. При дальнейшем погружении ножа контакт *6* ручки войдет в зажим *7* на металлическом корпусе и реостат будет замкнут накоротко, т. е. выключен из работы.

Жидкостные реостаты применяются в цепях при больших токах.

Ламповый реостат (фиг. 359) представляет набор нескольких параллельно включаемых электрических ламп. Известно, что если одна лампа накаливания будет иметь сопротивление в 150 *ом*, то две такие же лампы будут иметь общее сопротивление уже только 75 *ом*, три лампы — 50 *ом* и т. д.

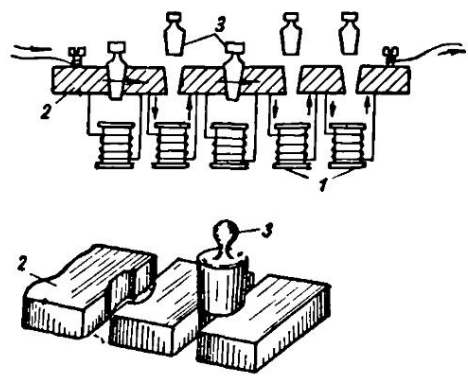
Таким образом, общее сопротивление нескольких одинаковых, параллельно включенных ламп будет равно сопротивлению

одной лампы, деленному на число включенных ламп. Ламповый реостат, показанный на рисунке, включен в цепь аккумулятора для его заряда и служит для регулировки зарядного тока.



Фиг. 359. Ламповый реостат

Штепсельные реостаты, часто называемые нами магазинами сопротивлений (фиг. 360), представляют набор определенных точно выверенных сопротивлений. Концы катушек сопротивлений *1* присоединяются к разрезанной медной планке *2*. Когда в вырезы планки *2* вставляется медный штепсель *3*, то он соединяет собой две соседние части планки. Этим сопротивление, подключенное своими концами к соседним частям планки, выключается из цепи или, как говорят, закорачивается (замыкается накоротко).



Фиг. 360. Штепсельный реостат

Вынутый штепсель заставляет электрический ток проходить по катушке сопротивления.

Магазины сопротивлений позволяют легко включать в цепь сопротивления точно определенной величины и применяются при электрических измерениях.

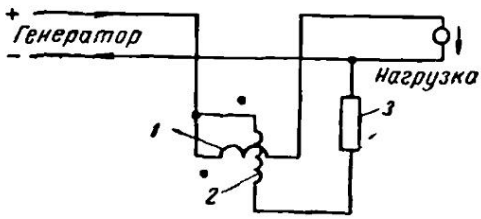
§ 176. Измерение активной электрической мощности

1. Постоянный ток. Из формулы мощности постоянного тока

$$P = UI$$

видно, что определение мощности может быть произведено

путем умножения показаний амперметра и вольтметра. Однако на практике измерение мощности обычно производится при помощи специальных приборов — ваттметров. Рассмотрим схему ваттметра электродинамической системы (фиг. 361). Ваттметр состоит из двух катушек: неподвижной *1*, состоящей из небольшого числа витков толстой проволоки, и подвижной *2*, состоящей из большого числа витков тонкой проволоки. При включении ваттметра ток нагрузки проходит через неподвижную катушку, последовательно включенную в цепь, а подвижная катушка включается параллельно потребителю. Для уменьшения потребляемой мощности в параллельной обмотке и уменьшения веса подвижной катушки последовательно с ней включается добавочное сопротивление *3* из манганина. В результате взаимодействия магнитных полей подвижной и неподвижной катушек возникает момент вращения, пропорциональный токам обеих катушек:



Фиг. 361. Принципиальная схема электродинамического ваттметра

$$M = c_1 I_1 I_2.$$

Ток параллельной обмотки при постоянном сопротивлении параллельной цепи пропорционален напряжению цепи. Отсюда

$$M = c_2 I_1 U = c_2 P,$$

т. е. вращающий момент прибора пропорционален мощности, потребляемой в цепи.

Чтобы стрелка прибора отклонялась от нуля вправо, необходимо ток через катушку пропускать в определенном направлении.

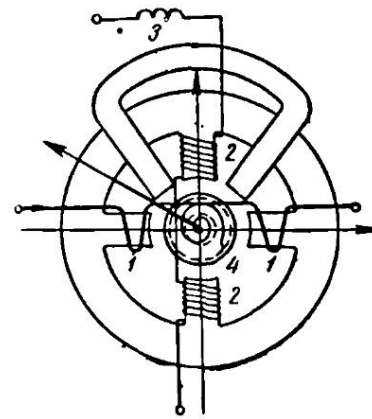
Для этого два зажима, указывающие начала обмоток, обозначаются знаком * и электрически соединяются. На шкале ваттметра указываются номинальный ток и номинальное напряжение прибора. Так, например, если на шкале прибора обозначено 5 *а* и 150 *в*, то прибор может измерять мощность до 750 *вт*. Шкалы некоторых ваттметров градуированы в делениях. Если, например, ваттметр на 5 *а* и 150 *в* имеет 150 делений, то цена деления, или постоянная ваттметра, равна 750 : 150 = 5 *вт/дел*.

Кроме электродинамических ваттметров, для измерения мощности в цепях постоянного тока употребляются также ваттметры ферродинамической системы.

2. Однофазный переменный ток. При включении электродинамического ваттметра в цепь переменного тока магнитные поля подвижной и неподвижной катушек, взаимодействуя между со-

бой, вызовут поворот подвижной катушки. Мгновенный момент вращения подвижной части прибора пропорционален произведению мгновенных значений токов в обеих катушках прибора. Но вследствие быстрых изменений токов подвижная система не сможет следовать за этими изменениями и момент вращения прибора будет пропорционален средней или активной мощности $P = U \cdot I \cdot \cos\varphi$. Следовательно, по углу поворота подвижной части ваттметра можно судить о величине активной мощности, потребляемой цепью.

Для измерения мощности переменного тока пользуются также ваттметрами индукционной системы. На фиг. 362 показана схема включения индукционного ваттметра с вращающимся магнитным полем. Последовательная обмотка *1—1*, состоящая из небольшого числа витков толстой проволоки, располагается на двух противоположных полюсных выступах и включена последовательно в цепь. Параллельная обмотка *2—2* ваттметра, состоящая из большого числа витков тонкой проволоки, располагается на двух отдельных полюсных выступах. Последовательно с обмоткой *2—2* включается индуктивное сопротивление *3*, служащее для получения угла сдвига 90° между ее напряжением и током. Тем самым при чисто активной нагрузке получаем сдвиг на угол 90° между токами в последовательной и параллельной обмотках, что является необходимым условием создания вращающегося магнитного поля. При включении прибора это поле, пересекая алюминиевый цилиндр *4*, индуктирует в нем вихревые токи, которые, взаимодействуя с полем, создают вращающий момент, воздействующий на подвижную часть прибора. Угол поворота ее при любой нагрузке будет пропорционален активной мощности, потребляемой цепью:



Фиг. 362. Схематическое устройство индукционного ваттметра с вращающимся полем

$$P = UI\cos\varphi.$$

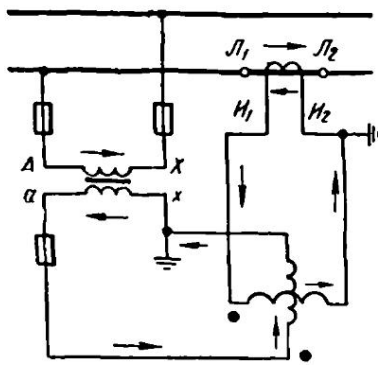
Принципиальная схема индукционного ваттметра с бегущим полем была дана на фиг. 335.

При измерении ваттметром мощности в сетях низкого напряжения с большими токами применяют трансформаторы тока. Для уменьшения разности потенциалов между обмотками ваттметра первичная и вторичная цепи трансформатора тока имеют общую точку. Вторичная обмотка трансформатора не заземляется, так как это означало бы заземление одного провода сети.

Для определения мощности сети P_1 в этом случае нужно показание ваттметра P_2 умножить на коэффициент трансформации трансформатора тока $k_т$:

$$P_1 = P_2 k_т.$$

В сетях высокого напряжения при измерении мощности используются измерительные трансформаторы напряжения и тока (фиг. 363). Для получения мощности сети P_1 нужно показание ваттметра P_2 умножить на произведение коэффициентов трансформации трансформаторов напряжения и тока:



Фиг. 363. Включение ваттметра с помощью измерительных трансформаторов

$$P_1 = P_2 k_н k_т$$

Так, например, если к ваттметру установлены трансформатор напряжения 6000/100 *в* и трансформатор тока 150/5 *а*, а ваттметр показал 80 *вт*, то мощность сети будет:

$$P_1 = 80 \cdot \frac{6000}{100} \cdot \frac{150}{5} =$$

$$= 144\,000 \text{ вт} = 144 \text{ квт}.$$

При включении ваттметров (счетчиков) через измерительные трансформаторы нужно присоединять эти приборы так, чтобы по обмоткам их проходили токи в том же направлении, как если бы они были непосредственно включены в сеть.

Кроме ваттметра, мощность однофазного переменного тока можно определить по показаниям трех приборов: амперметра, вольтметра и фазометра согласно формуле:

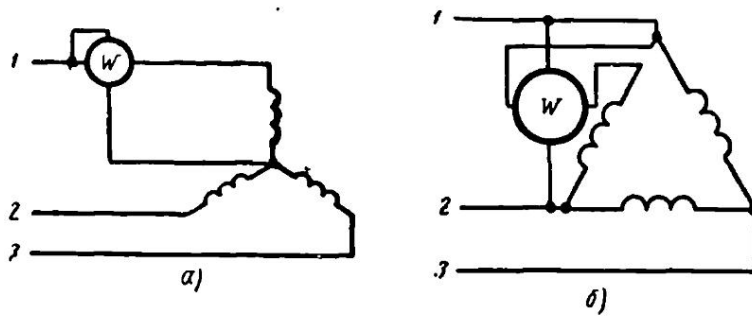
$$P = UI \cos \varphi.$$

3. Трехфазный переменный ток. При равномерной нагрузке трехфазной системы для измерения мощности пользуются одним однофазным ваттметром, включенным по схеме, показанной на фиг. 364 (*а* — для соединения звездой; *б* — для соединения треугольником). По последовательной обмотке ваттметра в этом случае протекает фазный ток, а параллельная обмотка включена к фазному напряжению. Поэтому ваттметр покажет мощность одной фазы. Для получения мощности трехфазной системы нужно показание однофазного ваттметра умножить на три.

При неравномерной нагрузке в четырехпроводной сети трехфазного тока для измерения мощности применяется схема трех ваттметров (фиг. 365). Каждый однофазный ваттметр измеряет

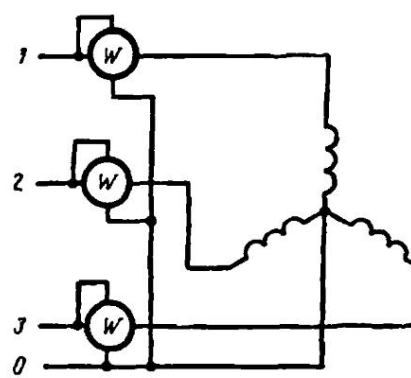
мощность одной фазы. Для получения мощности трехфазной системы необходимо взять сумму показаний трех ваттметров.

При переменной нагрузке трудно получить одновременный отсчет показаний трех ваттметров. Кроме того, три однофазных



Фиг. 364. Включение однофазного ваттметра при равномерной нагрузке (трехпроводная система):
а — для соединения звездой, *б* — для соединения треугольником

ваттметра занимают много места. Поэтому часто применяют один трехэлементный трехфазный ваттметр, представляющий собой соединение в одном приборе трех однофазных ваттметров. У трехэлементного электродинамического ваттметра три подвижные параллельные катушки насажены на одну ось, связанную со стрелкой, и общий момент, полученный в результате сложения механических усилий каждой катушки, будет пропорционален мощности, потребляемой в трехфазной сети. В других конструкцнях подвижные катушки, расположенные в разных местах, связаны между собой гибкими лентами и передают суммарное усилие на ось со стрелкой.



Фиг. 365. Включение трех однофазных ваттметров для измерения мощности трехфазной цепи

Активную мощность трехфазной сети при равномерной нагрузке можно определить при помощи трех приборов: амперметра, вольтметра и фазометра по формуле

$$P = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi,$$

где U и I — линейные напряжение и ток;

φ — угол сдвига между фазными напряжением и током.

Мощность трехпроводной трехфазной сети при любой нагрузке (равномерной или неравномерной), независимо от способа соединения потребителя (звездой или треугольником), может быть измерена по схеме двух ваттметров.

По первому закону Кирхгофа сумма мгновенных значений токов всех трех фаз равна нулю:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0,$$

откуда

$$i_2 = -i_1 - i_3.$$

Мгновенная мощность трехфазной системы будет:

$$p = i_1 u_1 + i_2 u_2 + i_3 u_3,$$

где u с индексами — мгновенные значения фазных напряжений.

Подставляя в последнее выражение значение тока i_2, получим:

$$p = i_1 u_1 - i_1 u_2 - i_3 u_2 + i_3 u_3$$

или

$$p = i_1 (u_1 - u_2) + i_3 (u_3 - u_2).$$

Полученное уравнение показывает, что один из ваттметров надо включить так, чтобы по его токовой катушке протекал ток первой фазы, а катушка напряжения находилась бы под разностью напряжений первой и второй фаз; другой ваттметр следует включить так, чтобы по его токовой катушке протекал ток третьей фазы, а катушка напряжения находилась бы под разностью напряжений третьей и второй фаз.

Сложив показания обоих ваттметров, получим мощность всех трех фаз.

На фиг. 366 показаны три варианта схемы двух ваттметров.

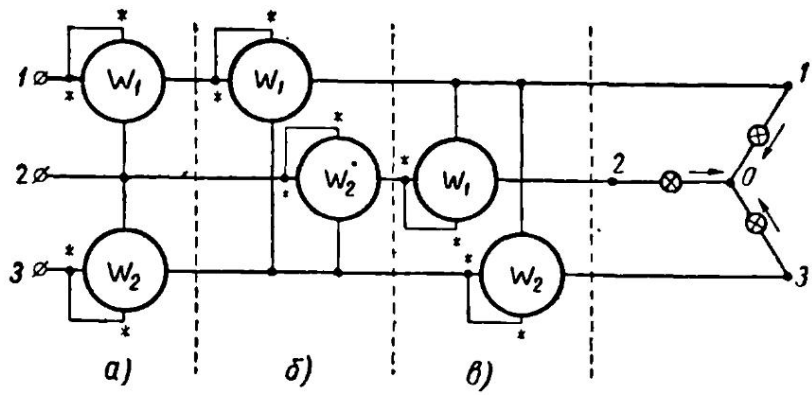
Из схем на фиг. 366 видно, что последовательные обмотки ваттметров включают в любые два линейных провода сети. Начала параллельных обмоток каждого ваттметра подключаются к тому же проводу, в который включена последовательная обмотка ваттметра. Концы параллельных обмоток подключаются к третьему линейному проводу.

При равномерной активной нагрузке ($\cos\varphi = 1$) показания ваттметров равны между собой. При $\cos\varphi$, не равном единице, показания ваттметров не будут равны. При $\cos\varphi$, равном 0,5, один из ваттметров покажет нуль. При $\cos\varphi$, меньшем 0,5, стрелка этого прибора начнет отклоняться влево. Чтобы получить показание прибора, необходимо переключить концы его последовательной или параллельной обмотки.

Для измерения активной мощности трехфазной системы по показаниям двух ваттметров нужно складывать их показания или вычитать из показания одного ваттметра показание друго-

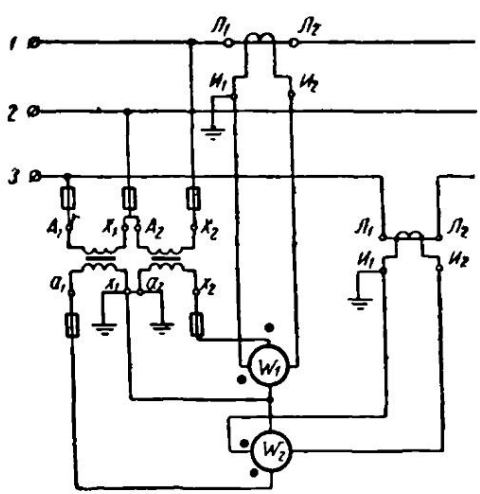
го ваттметра, которое было отрицательным. Схема измерения мощности двумя ваттметрами с помощью измерительных трансформаторов напряжения и тока дана на фиг. 367.

Удобнее измерять мощность при помощи трехфазного ваттметра, в котором совмещены два прибора, включенные по схеме

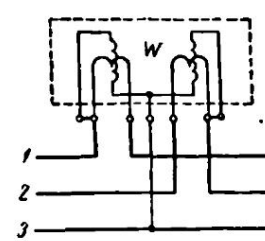


Фиг. 366. Схема включения двух ваттметров

двух ваттметров и действующие на одну общую ось, с которой связана стрелка. В приборах электродинамической и ферродинамической системы две подвижные катушки, расположенные на одной оси или связанные гибкими лентами, вращают одну ось. В приборах индукционной системы два элемента вращают два диска, сидящие на одной оси, или два элемента действуют на один диск. Схема включения двухэлементного трехфазного ваттметра дана на фиг. 368.



Фиг. 367. Измерение мощности по схеме двух ваттметров с помощью измерительных трансформаторов

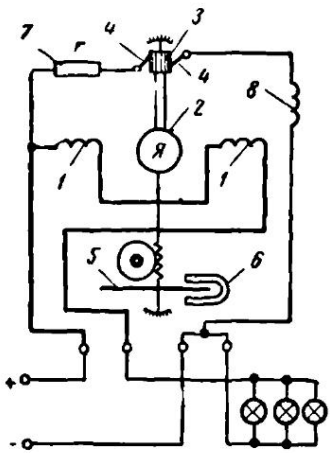


Фиг. 368. Схема включения трехфазного двухэлементного ваттметра

В сетях высокого напряжения трехфазный ваттметр включается при помощи измерительных трансформаторов напряжения и тока.

§ 177. Измерение активной электрической энергии

1. Постоянный ток. Для измерения расхода энергии при постоянном токе применяют счетчики трех систем: электродинамической, магнитоэлектрической и электролитической. Наибольшее распространение получили счетчики электродинамической системы (фиг. 369). Неподвижные токовые катушки *1—1*, состоящие из небольшого числа витков толстой проволоки, последовательно включены в сеть. Подвижная катушка шарообразной формы, называемая здесь якорем *2*, укреплена на оси, могущей вращаться в подпятниках. Обмотка якоря выполнена из большого числа витков тонкой проволоки и разделена на несколько секций. Концы секций припаяны к пластинам коллектора *3*, которого касаются металлические плоские щетки *4*. Напряжение сети подается в обмотку якоря через добавочное сопротивление *7*. При работе счетчика в результате взаимодействия тока в обмотке якоря и магнитного потока неподвижных токовых катушек создается момент вращения $M_{вр}$, под влиянием которого якорь начнет поворачиваться. Так как коллектор в определенные моменты времени будет включать к напряжению сети последующие секции обмотки якоря, то якорь будет сохранять постоянное направление вращения, откуда следует, что $M_{вр} = c_1 \cdot i_я \cdot \Phi$. Но так как $i_я \equiv U$, а $\Phi \equiv I$, то $M_{вр} = c_2 \cdot UI = c_2 P$, откуда видно, что вращающий момент счетчика пропорционален мощности, потребляемой в сети. На оси счетчика сидит алюминиевый диск *5*, который вращается в поле постоянного магнита *6*. В результате этого возникающие в диске вихревые токи взаимодействуют с полем магнита и создают тормозящий момент $M_т$, пропорциональный скорости диска:



Фиг. 369. Схема устройства электродинамического счетчика постоянного тока

$$M_т = c_3 n.$$

При постоянной скорости вращения вращающий и тормозящий моменты счетчика равны между собой:

$$M_{вр} = M_т$$

или

$$c_2 P = c_3 n,$$

откуда

$$P = \frac{c_3}{c_2} n = cn,$$

т. е. скорость вращения счетчика пропорциональна мощности сети. Рассматривая устройство электродинамического счетчика, мы могли заметить, что его работа напоминает работу двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением. Назначение коллектора у счетчика то же, что и у двигателя постоянного тока.

О количестве электрической энергии, потребляемой в сети, можно судить по числу оборотов, сделанных якорем (диском). При помощи червячной или зубчатой передачи вращение оси передается счетному механизму, причем передача подбирается таким образом, чтобы счетный механизм отмечал расход энергии в гектоватт-часах или киловатт-часах.

Количество энергии, приходящееся на один оборот якоря, называется *постоянной счетчика*. Число оборотов якоря, приходящееся на единицу учтенной электрической энергии, называется *передаточным числом*. Для проверки счетчика на его таблице указывается постоянная счетчика или передаточное число.

Пример 3. На щитке счетчика обозначено: «1 киловатт-час = 12 000 оборотов якоря». При проверке счетчика его диск сделал 120 оборотов за 50 сек. Определить мощность, потребляемую сетью, 1 *квт · ч* = 1000 *вт · ч* = = 3 600 000 *вт · сек*.

Постоянная счетчика равна:

$$\frac{3\,600\,000}{12\,000}\ вт \cdot сек/об.$$

Энергия за 120 оборотов:

$$\frac{3\,600\,000 \cdot 120}{12\,000}\ вт \cdot сек.$$

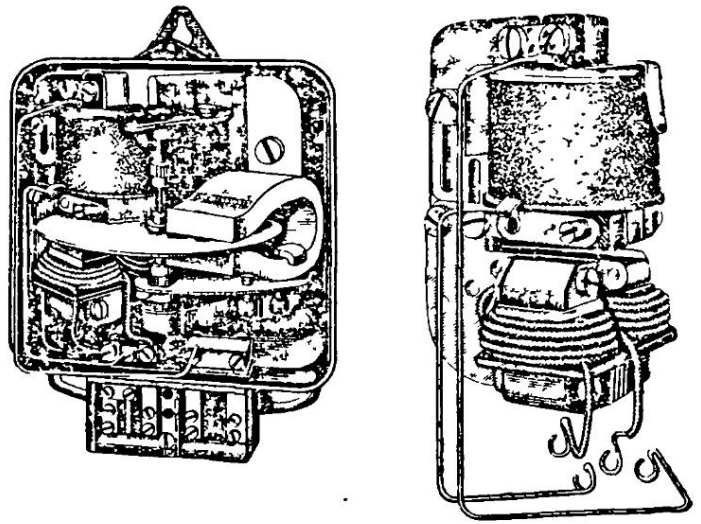
Мощность, потребляемая сетью:

$$\frac{3\,600\,000 \cdot 120}{12\,000 \cdot 50} = 720\ вт.$$

Для компенсации трения в счетчике последовательно с обмоткой якоря включается дополнительная катушка *8* (фиг. 369), магнитное поле которой, взаимодействуя с током в обмотке якоря, создает дополнительный момент вращения, компенсирующий влияние трения.

2. Однофазный переменный ток. Для измерения активной энергии в цепях однофазного переменного тока применяют счетчики индукционной системы. Устройство индукционного счетчика почти такое же, как и индукционного ваттметра. Разница состоит в том, что счетчик не имеет пружин, создающих противо-

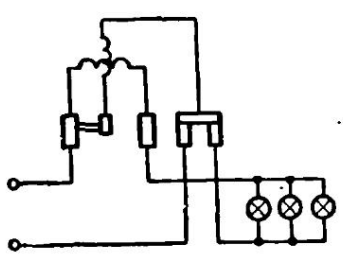
действующий момент, отчего диск счетчика может свободно вращаться. Стрелка и шкала ваттметра заменены в счетчике счетным механизмом. Постоянный магнит, служащий в ваттметре для успокоения, в счетчике создает тормозящий момент.



Фиг. 370. Внутреннее устройство индукционного счетчика однофазного тока (слева) и общий вид магнитопровода с катушками счетчика (справа)

Внешний вид однофазного индукционного счетчика показан на фиг. 370, а схема включения его в сеть дана на фиг. 371.

3. Трехфазный переменный ток. Активную энергию трехфазного переменного тока можно измерить с помощью двух однофазных счетчиков, включенных в сеть по схеме, аналогичной схеме двух ваттметров. Удобнее измерить энергию трехфазным счетчиком активной энергии, объединяющим в одном приборе работу двух однофазных счетчиков. Схема включения двухэлементного трехфазного счетчика активной энергии та же, что и схема соответствующего ваттметра.



Фиг. 371. Схема включения однофазного счетчика в сеть

В четырехпроводной сети трехфазного тока для измерения активной энергии применяют схему, аналогичную схеме трех ваттметров, или употребляют трехэлементный трехфазный счетчик. Подсчет энергии по показаниям

счетчиков, включенных по приведеиным выше схемам, производится так же, как и подсчет мощности по тем же схемам.

В сетях высокого напряжения включение счетчиков производится при помощи измернтельных траисформаторов напряжения и тока.

§ 178. Измерение реактивной энергии

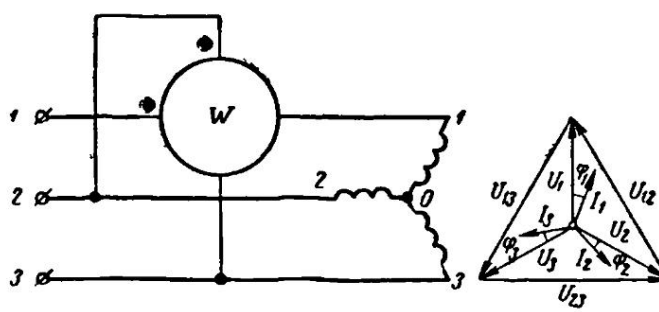
1. Однофазный перемеиный ток. Реактивную энергию однофазного тока можно определить по показаиию амперметра, вольтметра, фазометра и секундомера. Зиая величину $\cos\varphi$, находим по тригонометрическим таблнцам значение $\sin\varphi$ и, подставляя в формулу

$$A_p = UIt \sin \varphi$$

числовые значеиия, находим величину реактивной энергии.

Специальные счетчики реактивной энергии однофазиого тока, так называемые «синусные» счетчики, не получили распространения.

2. Трехфазный переменный ток. Для учета реактивной энергии в сетях трехфазиого тока можно применять нормальные счетчики активиой эиергии и специальные счетчики реактивной эиергии.



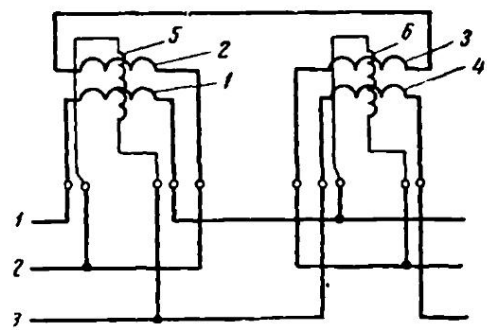
Фиг. 372. Схема измерения реактивной энергии однофазным счетчиком активной энергии

При равномериой нагрузке трехфазиой системы для измерения реактивной энергии можно воспользоваться обычным однофазным счетчиком активиой энергии, включенным по схеме фиг. 372. Здесь по последовательной обмотке счетчика проходнт ток первой фазы I_1, а параллельиая обмотка счетчика включена под линейное напряжение U_{23}, отстающее от фазиого напряжения U_1 на угол 90°, причем напряжение U_{23} в $\sqrt{3}$ раз больше U_1 (см. векториую диаграмму на фиг. 372 справа); тогда

$$A_p = U_{23} I_1 t \cos(90° - \varphi_1) = \sqrt{3}\ U_1 I_1 t \sin \varphi_1.$$

Счетчик будет учитывать увелнченную в $\sqrt{3}$ раз реактивную энергию первой фазы.

Для подсчета реактивиой энергии всей трехфазной системы необходимо показание счетчика, включеиного по этой схеме, увеличить в $\sqrt{3}$ раз. Рассмотрим устройство специального трехфазного счетчика реактивной энергнн. Устройство счетчика этого типа такое же, как и устройство двухэлемеитного трехфазного ваттметра. Параллельные обмоткн двух элементов включаются в сеть по схеме, изображеииой на фиг. 373. На U-образиые сердечники накладываются не две, а четыре последовательные обмотки. Причем на один из отростков U-образного сердечника первого элемента наматывается одна последовательная обмотка *1*. Вторая токовая обмотка *2* помещается на втором отростке сердечника первой системы и третья токовая обмотка *3* помещается на первом отростке второй системы. Наконец четвертая токовая обмотка *4* помещается на втором отростке U-образного сердечника второго элемента. Обмотки напряжений *5* и *6* включены, как показано на схеме. При включении реактивного счетчика необходимо соблюдать порядок чередования фаз.



Фиг. 373. Схема трехфазного счетчика реактивной энергии типа ИР электродинамической системы

§ 179. Измерение коэффициента мощности

Значение коэффициента мощности в сетях однофазного переменного тока можно определнть по показаниям вольтметра, амперметра и ваттметра согласно формуле:

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

Теми же приборами коэффициент мощности в сетях трехфазного тока с равномерной нагрузкой можио определить по формуле:

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}\,UI},$$

где U и I — линейные иапряжение и ток, а φ — угол сдвига между фазными напряжением и током.

Среднее значение коэффициента мощности $\cos\varphi_{ср}$ за определенный промежуток времени можно определить по показаниям активного и реактивного счетчиков за то же время согласно формуле:

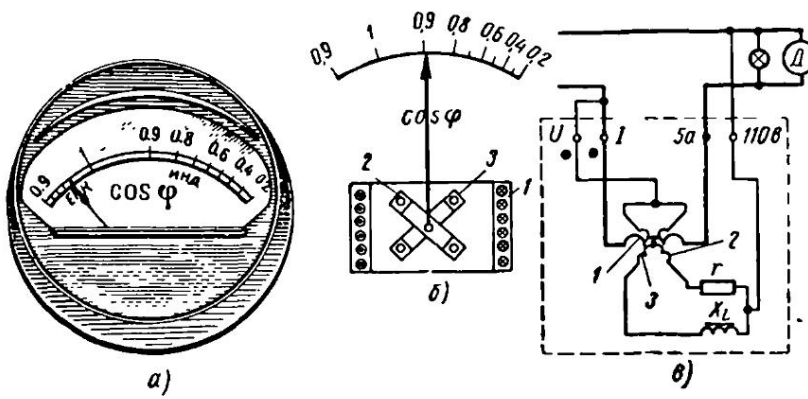
$$\cos\varphi_{ср} = \frac{A_a}{\sqrt{A_a^2 + A_p^2}},$$

где A_a — активная энергия;
A_p — реактивная энергия,
или, находя

$$\operatorname{tg}\varphi_{ср} = \frac{A_p}{A_a},$$

определяем по тригонометрическим таблицам соответствующий $\cos\varphi_{ср}$.

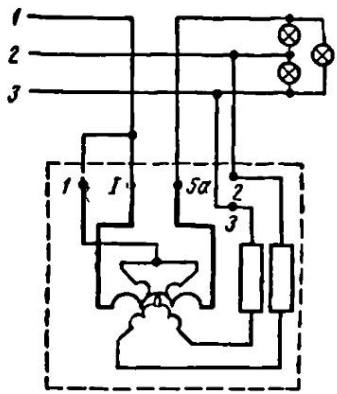
Мгновенное значение коэффициента мощности на практике определяют при помощи специальных приборов — фазометров (фиг. 374, *а*). Рассмотрим устройство электродинамического однофазного фазометра (фиг. 374, *б* и *в*). Прибор состоит из не-



Фиг. 374. Фазометр:
а — общий вид, *б* — схема устройства, *в* — схема внутренних соединений и включений в сеть

подвижной катушки *1*, последовательно включенной в сеть, и двух подвижных катушек *2* и *3*, сидящих на одной оси и расположенных между собой под углом 90°. Обмотки этих катушек имеют большое число витков тонкой проволоки и включены параллельно в сеть. Катушка *2* включена последовательно с активным сопротивлением r, и ток в ней i_2 совпадает по фазе с напряжением сети. Катушка *3* включена последовательно с большим индуктивным сопротивлением x_L, и ток в ней i_3 отстает по фазе на 90° от напряжения сети.

Момент, развиваемый катушкой *2*, пропорционален активной мощности сети (так же как у электродинамического ваттметра); момент катушки *3* пропорционален реактивной мощности сети. Катушки включены так, что их моменты противоположны друг другу. Пространственное положение подвижной части фазометра, которое определяется углом поворота катушек *2* и *3*, зависит от угла сдвига фаз φ между напряжением и током. Поэтому шкалу прибора можно отградуировать непосредственно в значениях коэффициента мощности cos φ.



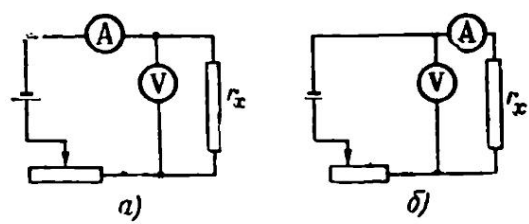
Фиг. 375. Схема внутренних соединений и включений в сеть трехфазного фазометра

Фазометр не имеет пружин для создания противодействующего момента, и поэтому стрелка при выключении прибора занимает безразличное положение. Прибор имеет двухстороннюю шкалу. Правая часть шкалы дает значение коэффициента мощности при индуктивной нагрузке, левая часть шкалы при емкостной нагрузке.

Схема электродинамического трехфазного фазометра изображена на фиг. 375. Сдвиг по фазе между токами в подвижных катушках достигается здесь не подбором активных и индуктивных сопротивлений, а соответствующим включением катушек в трехфазную сеть.

§ 180. Измерение сопротивлений

1. Метод амперметра и вольтметра. В цепях постоянного тока измерение сопротивления можно производить по схемам, пред-



Фиг. 376. Измерение сопротивлений методом амперметра и вольтметра

ставленным на фиг. 376. Зная падение напряжения на участке цепи и ток, протекающий по участку, можно вычислить сопротивление этого участка. В схеме *а* через амперметр будет про-

текать сумма токов искомого сопротивления и вольтметра. Сопротивление может быть в этом случае найдено по формуле

$$r_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{I - I_в} = \frac{U_x}{I - \frac{U_x}{r_в}},$$

где $I_в$ и $r_в$ — ток и сопротивление вольтметра.

По схеме *б* вольтметр покажет падение напряжения в искомом сопротивлении и в обмотке амперметра:

$$U = U_x + U_а,$$

где $U_а$ — падение напряжения в обмотке амперметра. Искомое сопротивление находится по формуле:

$$r_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U - U_а}{I_x} = \frac{U - I_x r_а}{I_x},$$

где $r_а$ — сопротивление обмотки амперметра.

Первая схема (фиг. 376, *а*) применяется для определения небольших сопротивлений, когда они значительно меньше сопротивления обмотки вольтметра. По второй схеме (фиг. 376, *б*) определяется величина больших сопротивлений, так как при этом можно пренебречь сопротивлением обмотки амперметра $r_а$.

При переменном токе по показаниям амперметра и вольтметра можно определнть величину полного сопротивления z потребителя согласно формуле:

$$z = \frac{U}{I}.$$

Если тот же потребитель включить в цепь постоянного тока, то по показаниям амперметра и вольтметра можно определить активное сопротивление

$$r = \frac{U}{I},$$

если пренебречь влиянием поверхностного эффекта.

Активное сопротивление в цепи переменного тока можно найти и непосредственно по показаниям ваттметра и амперметра согласно формуле:

$$r = \frac{P}{I^2}.$$

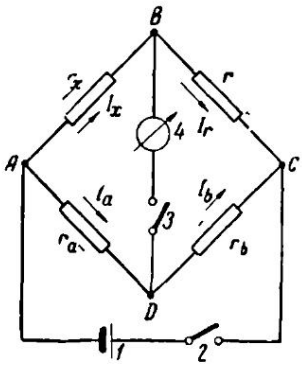
По формуле

$$x = \sqrt{z^2 - r^2}$$

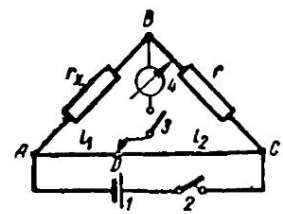
находим величину реактивного сопротивления потребителя.

Отметим, что только по показаниям амперметра, вольтметра и ваттметра знак x определить нельзя.

2. Четырехплечный мост сопротивлений. На фиг. 377 изображена схема моста сопротивлений. Батарея *1* через выключатель *2* подает напряжение на точки *A* и *C* моста. В другую диагональ моста через ключ *3* включается гальванометр *4*. Неизвестное сопротивление r_x, включено между точками *A* и *B*. Подбирая сопротивление r_a, r_b и r, добиваются того, чтобы при замкнутом ключе *3* показание гальванометра было равно нулю. Нужно отметить, что мостовые, иначе говоря, нулевые методы измерений являются наиболее точными. В этом случае по-



Фиг. 377. Четырехплечный мост сопротивлений



Фиг. 378. Схема моста с реохордом

тенциал точки *B* равен потенциалу точки *D*. Следовательно

$$U_{AD} = U_{AB} = I_a r_a = I_x r_x;$$
$$U_{DC} = U_{BC} = I_b r_b = I_r r.$$

Деля равенства почленно друг на друга, получим:

$$\frac{I_a r_a}{I_b r_b} = \frac{I_x r_x}{I_r r}.$$

Но так как $I_a = I_b$, а $I_x = I_r$ (через гальванометр ток не течет), то, сокращая, находим:

$$\frac{r_a}{r_b} = \frac{r_x}{r},$$

откуда

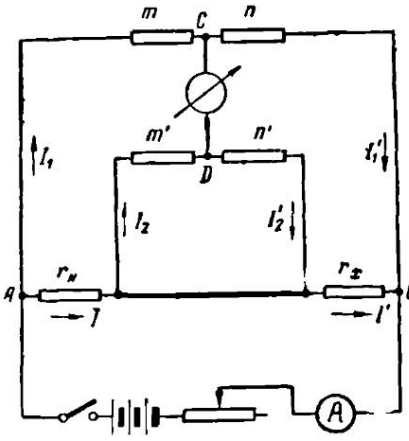
$$r_x = \frac{r_a}{r_b} r.$$

В качестве сопротивлений r_a, r_b и r используют магазины сопротивлений.

На фиг. 378 представлена другая схема моста сопротивлений. Между точками *A* и *C* натянута калиброванная проволока (реохорд), по которой скользит контакт *D*. Между точками *C* и *B* включен магазин сопротивлений, между точками *A* и *B* вклю-

чается измеряемое сопротивление. Для определения r необходимо величину сопротивления r, установленного на магазине сопротивлений, умножить на отношение $\frac{r_a}{r_b}$. Отношение сопротивлений в этой схеме моста заменено отношением длин участков калиброванной проволоки $\frac{l_1}{l_2}$, которое указывается на шкале моста.

При измерении сопротивления жидких проводников явление поляризации сильно искажает результаты измерений. Поэтому применяя мост сопротивления, питают его переменным током, получаемым от индукционной катушки, снабженной прерывателем и подключенной к источнику постоянного напряжения.



Фиг. 379. Схема двойного моста

Четырехплечными мостами сопротивлений нельзя измерять малые сопротивления (меньше 1 *ом*), так как сопротивления соединительных проводов и контактов оказывают влияние на результат измерений.

Для измерения малых сопротивлений (обмотки якорей машин постоянного тока, обмотки полюсов машин с последовательным возбуждением и т. п.) применяются так называемые двойные мосты.

3. Двойной мост. Схема показана на фиг. 379. Здесь r_x — искомое сопротивление; r_N — известное образцовое сопротивление; m, n, m', n' — магазины сопротивлений. Обычно берут $m=m'$ и $n=n'$. К точкам C и D подключен гальванометр. Включив рубильник в цепи батареи, подаем напряжение на точки A и B схемы. Путем подбора сопротивлений m, m', n, n' (сохраняя $m=m'$ и $n=n'$) добиваемся, чтобы стрелка гальванометра стала на нуль. В этом случае $I_1=I_1'$; $I=I'$ и $I_2=I_2'$.

По второму закону Кирхгофа имеем:

для контура $ACDA$

$$I_1 m - I_2 m' - I r_N = 0$$

или

$$I r_N = I_1 m - I_2 m',$$

для контура $CBDC$

$$I_1' n - I' r_x - I_2' n' = 0$$

или

$$I' r_x = I_1' n - I_2' n'.$$

Разделив эти равенства почленно, получим:

$$\frac{Ir_N}{I'r_x} = \frac{I_1 m - I_2 m'}{I_1' n' - I_2' n'}.$$

Принимая во внимание $m = m'$ и $n = n'$, получим:

$$\frac{r_N}{r_x} = \frac{(I_1 - I_2)\, m}{(I_1' - I_2')\, n} = \frac{m}{n}.$$

Откуда следует

$$r_x = r_N \frac{n}{m}.$$

Убедимся, что переходные сопротивления в контактах и сопротивления соединительных проводов не оказывают влияния на точность измерения.

Ток от батареи, дойдя до точки A, разветвляется по двум ветвям и делится на две части: токи I и I_1. Токи I и I_1 встречают на своем пути сопротивления соединительных проводов, сопротивления переходных контактов, которые соединены последовательно с сопротивлениями магазинов m, n, m', n' и поэтому складываются с ними. Но так как сопротивления m, n, m' и n' берутся не менее 10 *ом*, т. е. значительно больше сопротивлений соединительных проводов и переходных контактов и, кроме того, в формулу $r_x = r_N \frac{n}{m}$ сопротивления n и m входят в виде отношения, практически влияние сопротивлений соединительных проводов и переходных контактов равно нулю.

Для увеличения точности измерений провод, соединяющий сопротивления r_N и r_x, должен иметь очень малое сопротивление.

4. Мегомметры. Мегомметры служат для измерения сопротивления изоляции отдельных частей электротехнических установок по отношению к «земле» и друг относительно друга.

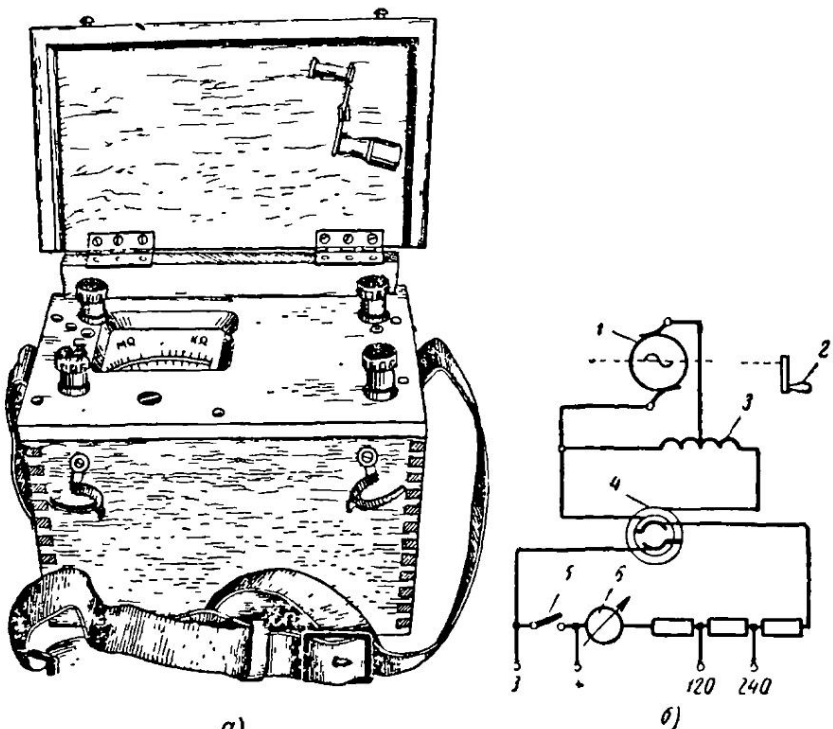
Согласно правилам сопротивление изоляции проводов должно быть не менее чем 1000 *ом* на каждый вольт рабочего напряжения. Так, например, для сети с рабочим напряжением 220 *в* сопротивление изоляции должно быть не менее 220 000 *ом*, или 0,22 *мгом*.

Измерение сопротивления изоляции должно производиться напряжением, по возможности равным рабочему, и во всяком случае напряжением, не меньшим 100 *в*.

Мегомметры, показания которых зависят от напряжения, состоят из источника напряжения и измерителя. Если последовательно в цепь включить регулируемое сопротивление r, то показания измерителя (вольтметра) будут зависеть от величины этого сопротивления (при постоянном напряжении цепи). При $r = 0$ показание вольтметра будет наибольшим, при $r = \infty$ вольтметр покажет нуль. Включая в цепь различные сопротивления, можно

отградуировать шкалу измерителя непосредственно в омах (килоомах, мегомах). В дальнейшем таким прибором можно воспользоваться для измерения сопротивлений, если применить источник энергии с напряжением, равным напряжению при градуировке.

На фиг. 380 показана схема испытателя изоляции МПИ. Генератор переменного тока *1* приводится во вращение при помощи ручки *2*. Генератор подает напряжение на повышающий



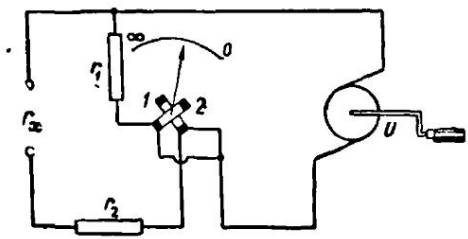
а) *б)*

Фиг. 380. Мегомметр МПИ:
а — общий вид, *б* — электрическая схема

автотрансформатор *3*, увеличивающий напряжение генератора до 400 *в*. Переменное напряжение при помощи выпрямляющего устройства *4* преобразуется в постоянное. Для измерения изоляции провода зажим *3* заземляют, зажим «+» соединяют с медной жилой провода и, нажимая кнопку *5*, вращают рукоятку генератора с такой скоростью, чтобы стрелка прибора *6* дала полное отклонение. Затем, отпуская кнопку, отсчитывают сопротивление изоляции на шкале прибора. Прибором можно измерять также напряжения постоянного тока 120 и 240 *в*. Зависи-

мость показаний испытателя изоляции от скорости вращения генератора является большим его недостатком. Разберем другую конструкцию мегомметра, у которого изменение скорости вращения генератора не отражается на пронзводстве измерений.

На фиг. 381 дана схема мегомметра типа МОМ завода «Электроприбор». Подвижной частью прибора являются две катушки *1* и *2*, насаженные на ось и расположенные в поле постоянного магнита под углом 90° друг относительно друга. Генератор на 500 *в* (прн числе оборотов ручки, равном 120 *об/мин*) подает напряженне обенм катушкам через особые провода. Последовательно с одной катушкой включается постоянное сопротивление (или несколько сопротивлений для расширения пределов измерения). Последовательно с другой катушкой вводится неизвестное сопротивление, величину которого нам необходимо измерить. Токи, протекая по обеим катушкам и взаимодействуя с магнитным полем, создают вращающие моменты, направленные в противоположные стороны.



Фиг. 381. Схема мегомметра МОМ

На проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует снла

$$F = BIl \sin \alpha.$$

Вращающий момент $M_{вр}$, воздействующий на катушку, состоящую из w витков, имеющую ширину b и длину l, приблизительно равную активной длине катушки, будет:

$$M_{вр} = 2BIlw \frac{b}{2} \sin \alpha,$$

где α — угол между перпендикуляром к плоскости катушки и направлением магнитиого поля.

Так как $l \cdot b$ есть площадь катушки S, то

$$M_{вр} = BISw \sin \alpha.$$

На катушки мегомметра будут действовать вращающие моменты:

$$M_1 = w_1 SB \sin \alpha I_1;$$
$$M_2 = w_2 SB \cos \alpha I_2.$$

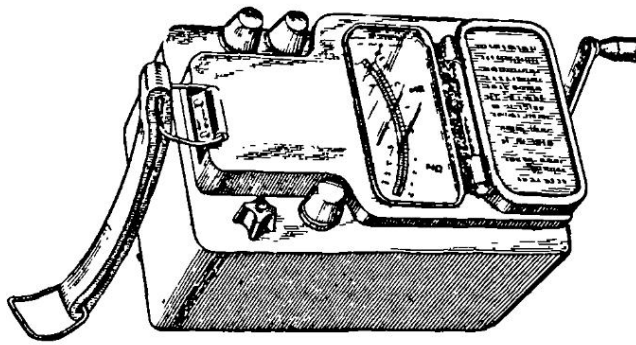
В положении равновесия $M_1 = M_2$, откуда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{w_2 I_2}{w_1 I_1} = c \frac{I_2}{I_1} = c \frac{r_1}{r_2 + r_x}.$$

Угол поворота подвижной части прибора зависит от отношения токов в катушках и не зависнт от приложенного напряжения генератора. Зная c, r_1, r_2 и угол α, находим r_x. Изменение

скорости рукоятки в широких пределах (от 60 до 180 *об/мин*) не влияет на точность измерений.

На фиг. 382 показан внешний вид переносного магнитоэлектрического мегомметра М-1101.



Фиг. 382. Внешний вид мегомметра М-1101

Задачи для самостоятельного решения

1. Прибор показывает 9,9 *а*. Действительная величина тока 10 *а*. Определить погрешности и поправку. Шкала прибора на 20 *а*.

2. Определить сопротивление шунта к амперметру с внутренним сопротивлением 0,016 *ом*, если показания прибора нужно увеличить в пять раз.

3. К амперметру включен шунт, сопротивление которого в 25 раз меньше сопротивления прибора. Какой ток протекает в цепи, если амперметр показал 3 *а*?

4. Вольтметром на 15 *в* нужно измерить напряжение 120 *в*. Определить величину добавочного сопротивления, если внутреннее сопротивление вольтметра 2000 *ом*.

5. Частотомер на 127 *в* обладает сопротивлением 8000 *ом*. Каково должно быть добавочное сопротивление, чтобы этот частотомер можно было включить в сеть 220 *в*?

6. Каковы погрешности однофазного ваттметра, показывающего 60 *вт* при напряжении 120 *в*, токе 0,6 *а* и $\cos\varphi=0{,}83$?

7. Вольтметр включен через измерительный трансформатор 3000/100 *в*. Определить напряжение на стороне высоковольтных шин, если вольтметр показал 95 *в*.

8. Амперметр, включенный через трансформатор тока 150/5 *а*, показал 4 *а*. Определить ток в первичной цепи.

9. Амперметр на 10 *а*, шкала которого имеет 100 делений, включен через трансформатор тока 500/5 *а*. Показания амперметра 42 деления. Определить ток в первичной цепи трансформатора.

10. Трехфазный ваттметр включен через измерительные трансформаторы напряжения 3000/100 *в* и тока 50/5 *а*. Определить мощность первичной цепи, если ваттметр показал 150 *вт*.

11. Ваттметр на 150 *в*, 5 *а*, 150 делений включен через измерительные трансформаторы 3300/100 *в* и 600/5 *а*. Вычислить мощность первичной цепи, если показание ваттметра 72 деления.

12. Однофазный ваттметр на 150 *в*, 5 *а*, 250 делений включен в трехфазную систему с равномерной нагрузкой через измерительные трансформаторы 500/100 *в* и 40/5 *а*. Определить мощность трехфазной сети, если ваттметр показал 50 делений.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте условия равновесия подвижной части электроизмерительного прибора.
2. Как можно разделить электроизмерительные приборы по роду измеряемой величины, по роду тока, по физическому принципу, по классу точности?
3. Каковы требования к электроизмерительным приборам?
4. Как устроены магнитоэлектрические измерительные приборы, их достоинства, недостатки и область применения?
5. То же, для приборов электромагнитной системы.
6. То же, для приборов электродинамической системы.
7. То же, для приборов тепловой системы.
8. То же, для приборов индукционной системы.
9. То же, для приборов термоэлектрической системы.
10. То же, для приборов детекторной системы.
11. То же, для приборов вибрационной системы.
12. Какие условные обозначения помещаются на шкалах электроизмерительных приборов?
13. Какими приборами можно измерить мощность постоянного тока?
14. Вычертить схему включения счетчика постоянного тока.
15. Как измерить мощность переменного тока?
16. Дать схему включения счетчика однофазного переменного тока.
17. Вычертить схему включения трехэлементного ваттметра в сеть трехфазного тока.
18. Вычертить схему включения двухэлементного трехфазного ваттметра в сеть высокого напряжения.
19. Как можно измерить реактивную энергию?
20. Как можно определить коэффициент мощности?
21. Вычертить схему включения трехфазного счетчика реактивной энергии.
22. Вычертить схему включения электродинамического фазометра в высоковольтную сеть трехфазного тока.
23. Как можно измерить сопротивление в сетях постоянного и переменного тока?
24. Как измеряют сопротивление изоляции проводов?

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

§ 181. Общие сведения

У каждой рабочей машины имеется такая ее часть, которая, получив движение, совершает своими орудиями (инструментами) операции, производившиеся раньше рабочим вручную при помощи тех же инструментов.

Эта часть машины называется исполнительным механизмом. Для приведения в движение исполнительного механизма необходим двигатель и передаточный механизм. В качестве двигателя может использоваться: сила человека (ножной привод токарного станка, точила); сила животных (некоторые машины в сельском хозяйстве); сила ветра, воды, пара (ветряные двигатели, водяные и паровые турбины); двигатели внутреннего сгорания (трактор, автомобиль, самолет); электрический двигатель. В передаточный механизм могут входить валы, шкивы, зубчатые колеса, приводные ремни и т. п.

Двигатель и передаточный механизм приводят в движение исполнительный механизм. Поэтому эти две части машины называются **приводом**.

Если для приведения в движение рабочей машины используется электрический двигатель, то такой привод называется электрическим приводом или сокращенно **электроприводом**.

Первым практическим применением электропривода следует считать использование его на катере академиком Борисом Семеновичем Якоби в 1838 г. На катере был установлен электрический двигатель, получавший питание от гальванической батареи. Катер перевозил 11 пассажиров и двигался со скоростью 4 *км/час*.

Регулятор с двигателем постоянного тока для дуговых ламп был предложен в 1879 г. Владимиром Николаевичем Чиколевым (1845—1898). Вопросы производства, передачи и распределения электроэнергии были успешно разрешены благодаря трудам русских электротехников Павла Николаевича Яблочкова, Михаила Осиповича Доливо-Добровольского, Ивана Филипповича Усагина.

П. Н. Яблочков много сделал в области практического применения переменного тока. Изобретенный П. Н. Яблочковым и И. Ф. Усагиным трансформатор позволил передавать электроэнергию на расстояние. Широкому внедрению переменного тока и его промышленному использованию мы обязаны М. О. Доливо-Добровольскому, создавшему трехфазные системы переменного тока.

Изобретение Доливо-Добровольским в 1890 г. трехфазного асинхронного двигателя послужило мощным толчком к широкому распространению электрического привода в промышленности различных стран мира. Электрический привод сначала медленно, но затем все быстрее и быстрее вытеснял другие виды привода. Мощность электрических двигателей по отношению к общей мощности установленных двигателей составляла в 1890 г. 5%, в 1927 г. 75%, а в настоящее время около 100%.

Электроприводы, применяемые в производстве, можно разбить на три основных типа: групповой, одиночный и многодвигательный.

Групповой электропривод состоит из одного электрического двигателя, который через трансмиссию и контрпривод приводит в движение несколько исполнительных механизмов.

Контрпривод представляет собой короткий вал, лежащий в подшипниках. На валу расположены ступенчатый шкив, рабочий (связанный с валом) и холостой (свободно сидящий на валу) шкивы. Контрпривод дает возможность изменять скорость вращения станка (при помощи ступенчатого шкива), останавливать и пускать станок (при помощи рабочего или холостого шкива). Остановка приводного двигателя приводит к прекращению работы всех исполнительных механизмов, получающих от него механическую энергию. При работе только части исполнительных механизмов групповой привод имеет низкий к. п. д.

Одиночный электропривод состоит из электродвигателя, который приводит в движение отдельный исполнительный механизм.

Одиночным приводом оборудованы одношпиндельные сверлильные станки, токарные станки малой мощности и др. Первоначально передача движения от двигателя к станку производилась через контрпривод. Впоследствии сам электродвигатель был подвергнут конструктивным изменениям и стал составлять одно целое с исполнительным механизмом.

Такой одиночный привод называется индивидуальным.

Многодвигательный привод состоит из нескольких электродвигателей, каждый из которых служит для приведения в движение отдельных элементов исполнительного механизма. Многодвигательные приводы применяются для сложных металлообрабатывающих станков большой мощности, прокатных станов, бумагоделательных машин, подъемных кранов и других машин и механизмов. В качестве примера рассмотрим привод ра-

диально-сверлильного станка. Станок обслуживается четырьмя электродвигателями. Один двигатель приводит в движение шпиндель, второй поднимает и опускает рукав со шпинделем, третий производит поворот рукава вокруг вертикальной оси и, наконец, четвертый двигатель подает охлаждающую жидкость к сверлу.

Мостовые подъемные краны имеют по три электродвигателя. Двигатель подъема поднимает и опускает груз, двигатель тележки двигает ее вдоль фермы крана, двигатель моста передвигает кран вдоль цеха.

§ 182. Характеристики электродвигателей

По роду тока электропривод делится на электропривод постоянного тока и электропривод переменного тока.

В зависимости от способа соединения обмоток якоря и возбуждения различают двигатели постоянного тока с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

Выше мы рассмотрели синхронные и асинхронные двигатели переменного тока. Напомним, что синхронные двигатели возбуждаются постоянным током от возбудителя. Скорость вращения этих двигателей зависит от частоты переменного тока. При постоянной частоте тока скорость двигателя строго постоянна.

Асинхронные двигатели возбуждаются со стороны первичной цепи переменным током. Число оборотов асинхронных двигателей меняется в зависимости от величины нагрузки.

Работа двигателя характеризуется номинальными данными, которые указываются на паспорте двигателя.

Номинальный режим работы двигателя есть режим, соответствующий условиям работы и данным, указанным на паспорте.

Номинальная мощность $P_н$ двигателя есть механическая мощность, развиваемая на его валу при номинальном режиме и указываемая на паспорте в ваттах или киловаттах.

Номинальная скорость двигателя $n_н$ есть скорость, указанная на его паспорте и соответствующая номинальному режиму двигателя.

Номинальный момент вращения $M_н$ есть момент, развиваемый двигателем на валу при номинальной мощности и номинальной скорости вращения, соответствующей номинальному режиму его работы.

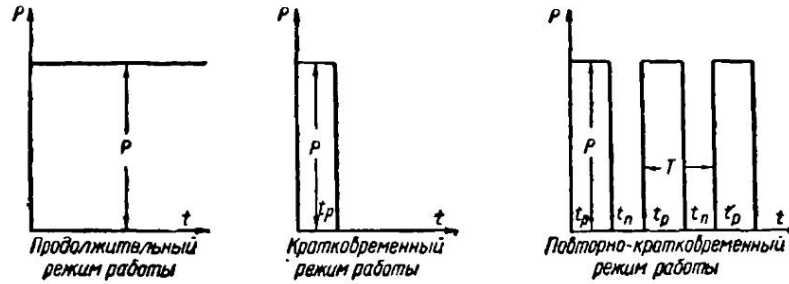
§ 183. Режимы работы электрических двигателей

Срок службы машины зависит от наибольших температур, при которых работает примененная в машине изоляция. Во время преобразования в двигателе электрической энергии в механическую за счет потерь в меди, стали и на трение происходит выделение тепла. Температура двигателя при этом увеличивается. Одновременно с нагревом отдельных частей двигателя идет

отдача тепла с его поверхности в окружающую среду. При длительной работе количество тепла, выделяемое двигателем, и количество тепла, отдаваемое им в окружающую среду, становятся равными, повышение температуры двигателя прекращается и она достигает своего установившегося состояния. Поэтому при определении мощности машины необходимо различать следующие три режима работы:

1. Продолжительный режим работы характеризуется работой, при которой рабочий период настолько велик, что нагрев машины достигает своего установившегося состояния.

Примером продолжительной работы может служить работа двигателей вентиляторов, компрессоров, насосов, двигателя генераторных установок и т. п. Продолжительность работы таких двигателей исчисляется часами и даже сутками.



Фиг. 383. Графики работы двигателей для различных режимов работ

2. Кратковременный режим работы характеризуется тем, что во время рабочего периода температура двигателя не успевает достигнуть установившегося состояния. Наступившая после рабочего периода пауза настолько велика, что температура двигателя снижается до температуры окружающей среды.

Примером кратковременной работы может служить работа двигателя разводных мостов, шлюзов и т. п.

3. Повторно-кратковременный режим работы характеризуется чередованием рабочих периодов и пауз. Продолжительность одного рабочего периода и одной паузы не должна превышать 10 мин. Режим повторно-кратковременной работы определяется относительной продолжительностью рабочего периода, под которой понимается отношение времени рабочего периода t_p к суммарной продолжительности T рабочего периода и паузы. Например, если за 8-часовой рабочий день двигатель проработал 5 час., то относительная продолжительность рабочего периода будет:

$$\frac{t_p}{T} = \frac{5}{8} \cdot 100\% = 62{,}5\%.$$

Относительная продолжительность рабочего периода выражается в процентах и обозначается ПВ (что означает продолжительность включения). Нормальными значениями ПВ считаются 15, 25 и 40%. ПВ указывается на паспорте двигателя.

Примером повторно-кратковременной работы служит работа двигателей кранов, лебедок, лифтов, прокатных станов, некоторых металлообрабатывающих станков (прессов, долбежных, строгальных станков) и т. п.

На фиг. 383 представлены графики работы двигателей для различных режимов.

§ 184. Изоляция электрических машин

Мощность двигателя определяется его нагревом. Допустимый нагрев машины ограничивается теплостойкостью изоляционных материалов, а также системой охлаждения двигателя.

Изолирующие материалы, применяемые в электрических машинах, делятся на пять классов.

Класс изоляции А. В него входят хлопчатобумажные ткани, шелк, пряжа, бумага и другие органические материалы, пропитанные различными маслами, а также эмали и лаки.

Класс изоляции В. Сюда входят изделия из слюды, асбеста и других неорганических материалов, содержащих органические связывающие вещества.

Класс изоляции ВС. Состоит из слюды, стеклянной пряжи и асбеста на теплостойких лаках.

Класс изоляции СВ. Состоит из неорганических материалов на теплостойких лаках без применения изолирующих материалов класса А.

Класс изоляции С. Включает слюду, фарфор, стекло, кварц и другие неорганические материалы без связывающих веществ.

Наибольшая допустимая температура нагрева для изоляции класса А — 105°, для класса В — 120°, для класса ВС — 135°, для класса СВ несколько выше, в зависимости от теплостойкости применяемых лаков, для класса С температура не устанавливается.

За среднюю температуру окружающей среды принимают +35°.

§ 185. Формы исполнения электрических машин

По способу защиты от воздействия внешней среды различают следующие формы исполнения электрических машин:

1. Открытая электрическая машина. Вращающиеся и токоведущие части машины в этом исполнении не защищены от случайного прикосновения и попадания на них посторонних предметов.

2. Защищенная электрическая машина. Вра-

щающиеся и токоведущие части такой машины защищены от случайного прикосновения и попадания на них посторонних предметов.

3. Каплезащитная электрическая машина. Внутренние части такой машины предохранены от попадания капель воды, падающих отвесно.

4. Брызгозащитная электрическая машина. Внутренние части машины защищены от попадания водяных брызг, падающих под углом 45° к вертикали с любой стороны.

5. Закрытая электрическая машина. Внутренние части машины этого исполнения отделены от внешней среды, но не настолько плотно, чтобы ее можно было считать герметической. Эта машина применяется в пыльных помещениях и может устанавливаться на открытом воздухе.

6. Водозащищенная электрическая машина. Внутреннее пространство машины защищено от проникновения в него воды при обливании машины из брандспойта. Применяется в судовых установках.

7. Взрывобезопасная электрическая машина. Закрытая машина, выполненная таким образом, что может противостоять взрыву внутри нее тех газов, которые содержатся в наружной среде. Щели, через которые внутреннее пространство сообщается с окружающей средой, имеют такую длину, что при взрыве внутри машины пламя не может выйти за пределы машины. Взрывобезопасные машины применяются на угольных шахтах и некоторых химических предприятиях.

8. Герметическая машина. Совершенно закрытая машина, у которой все отверстия закрыты настолько плотно, что при определенном наружном давлении исключается всякое сообщение между внутренним пространством машины и газовой средой или жидкостью, окружающей машину извне.

§ 186. Охлаждение электрических машин

По способу охлаждения машины делятся на следующие типы:

1. Машины с естественным охлаждением, не имеющие специальных вентиляторов. Циркуляция охлаждающего воздуха осуществляется за счет вентилирующего действия вращающихся частей машины и явления конвекции. Этот тип охлаждения встречается у машин открытого исполнения.

2. Машины с искусственной вытяжной или нагнетательной вентиляцией, в которых циркуляция газа (обычно воздуха), охлаждающего нагретые части, усиливается специальным вентилятором, в том числе:

а) машины с самовентиляцией, имеющие вентилятор на валу (защищенные или закрытые);

б) машины с независимой вентиляцией, венти-

лятор которых приводится во вращение посторонним двигателем (закрытые машины).

Машины малой и средней мощности, работающие в достаточно просторных помещениях, имеющих чистый воздух для охлаждения, засасывают воздух из помещения и выбрасывают его в то же помещение.

Машины закрытого типа, работающие в помещениях с загрязненным воздухом, засасывают воздух по трубопроводу извне и производят выброс в само помещение.

Во избежание чрезмерного нагрева помещения закрытые машины крупной мощности забирают воздух извне и выбрасывают его также наружу по трубопроводам.

Машины с замкнутой системой вентиляции имеют постоянный объем циркуляционного воздуха (или другого газа, например водорода), который после прохода через машину направляется в газоохладитель.

§ 187. Классификация двигателей по механической (скоростной) характеристике

В зависимости от изменения скорости вращения двигателя при изменении нагрузки на его валу двигатели можно классифицировать так:

1. Двигатели с постоянной скоростью вращения (жесткой характеристикой), у которых скорость вращения не зависит от нагрузки (синхронный двигатель).

2. Двигатель с твердой характеристикой, у которых с изменением нагрузки на валу скорость вращения меняется незначительно (двигатели постоянного тока с параллельным возбуждением, асинхронные двигатели переменного тока).

3. Двигатели с мягкой (падающей) характеристикой, скорость вращения которых в сильной степени зависит от нагрузки, причем увеличение нагрузки на валу вызывает значительное уменьшение скорости двигателя (двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением).

4. Двигатели с несколькими ступенями скорости (асинхронные и синхронные двигатели с переключением числа пар полюсов).

5. Двигатели с регулировкой скорости, у которых скорость вращения для одной и той же нагрузки можно менять в некоторых пределах (двигатели постоянного тока с регулировкой тока возбуждения, асинхронные двигатели с фазным ротором при наличии регулировочного реостата в цепи ротора).

§ 188. Выбор мощности двигателей

Работа всякого исполнительного механизма характеризуется:

1. Величиной силы сопротивления F, которую приходится преодолевать при выполнении технологического процесса,

2. Скоростью движения v или числом оборотов n, или угловой скоростью ω частей механизма.

3. Полезной $P_{пл}$ и потребляемой мощностью $P_{пт}$. При работе исполнительного механизма с постоянной скоростью преодолеваются лишь статические сопротивления, состоящие из полезного и вредных сопротивлений (трение в механизмах, сопротивление среды и др.). При неравномерном движении полное сопротивление слагается из статического сопротивления и динамического сопротивления, вызываемого инерцией движущихся масс.

При вращательном движении силы сопротивления можно заменить моментами:

$$M = M_c + M_д,$$

где M — полный момент сопротивления;

M_c — статический момент сопротивления;

$M_д$ — динамический момент сопротивления (инерция масс).

Моменты выражаются обычно в килограммометрах ($кГм$).

Статический момент сопротивления M_c слагается из момента полезного сопротивления $M_{пл}$ и момента сил трения $M_{тр}$:

$$M_c = M_{пл} + M_{тр} \; кГм.$$

Как известно из физики, при равномерном вращательном движении мощность $P_{вр}$ равна произведению момента вращения M_c на угловую скорость ω:

$$P_{вр} = M_c\omega \; кГм/сек;$$

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60},$$

где n — число оборотов в минуту.

Так как 1 $квт = 1{,}36$ $л.\,с.$, или 1 $квт = 1{,}36 \cdot 75 = 102$ $кГм/сек$, то

$$P_{вр} = \frac{M_c\, 2\pi n}{60 \cdot 102} \approx \frac{M_c n}{975} квт.$$

При увеличении скорости вращения исполнительного механизма потребуется затратить мощность на ускорение вращающихся частей. Наоборот, при уменьшении скорости мощность будет отдаваться вращающимися частями механизма и в некоторых случаях используется, например, для снятия пиков нагрузки (маховики) или возвращается в сеть (рекуперация).

Правильный выбор двигателя имеет большое значение. Недостаточная мощность двигателя не обеспечивает нормальной работы механизма, приводит к снижению производительности труда, сильному и опасному нагреву двигателя.

Чрезмерная мощность двигателя уменьшает к. п. д. установки, для двигателей переменного тока уменьшает коэффициент мощности, приводит к удорожанию установки и большим потерям энергии.

Рассмотрим несколько примеров расчета мощности двигателя для различных случаев нагрузки (в расчете мощности не учтена инерция вращающихся масс; этот расчет делается с учетом того, что в процессе работы скорость исполнительного механизма не меняется, отсутствуют частые пуски, а сам пуск совершается вхолостую).

1. Токарные станки. Мощность двигателя для токарных станков можно подсчитать по формуле

$$P = \frac{F_р v_р}{60 \cdot 102 \eta} квт,$$

где $F_р$ — усилие резания в $кГ$;
$v_р$ — скорость резания в $м/мин$;
η — к. п. д. станка.

Иногда для подсчета мощности двигателя пользуются выражением крутящих моментов (двойных для удобства вычисления):

$$2M = F_р d \ кГм,$$

где $F_р$ — усилие резания в $кГ$;
d — диаметр обрабатываемого изделия в $м$.

В этом случае мощность двигателя определяется по следующей формуле

$$P = \frac{2M_р n}{2 \cdot 975 \eta} квт.$$

Для привода токарных, а также других металлообрабатывающих станков применяются асинхронные двигатели трехфазного тока с кнопочным управлением.

2. Сверлильные станки. Мощность двигателя для сверлильных станков можно подсчитать по формуле

$$P = \frac{2M_р n}{2 \cdot 975 \eta} квт,$$

где $2M_р$ — двойной крутящий момент резания на сверле в $кГм$;
n — число оборотов сверла в минуту;
η — к. п. д. станка.

Для привода сверлильных станков используются асинхронные двигатели трехфазного тока.

3. Строгальные станки. Строгальные станки бывают: продольно-строгальные (обрабатываемая деталь, укрепленная на столе, получает возвратно-поступательное движение, резец неподвижно укреплен); поперечно-строгальные (стол с обрабатываемой деталью неподвижен, резец делает возвратно-поступательное движение); долбежные (не отличаются от поперечно-строгальных, но резец движется в вертикальной плоскости); специальные (зубострогальные).

Мощность двигателя и усилие резания для строгальных станков определяются так же, как и для токарных станков

4. Жидкостные насосы. Мощность двигателя для жидкостных насосов определяется по формуле:

$$P = \frac{Q\gamma H}{102\eta_{\text{нас}}\eta_{\text{пер}}} \text{ кВт},$$

где Q — производительность насоса в $м^3/сек$;

γ — вес жидкости в $кГ/м^3$;

H — полный напор в $м$;

$\eta_{\text{нас}}$ — к. п. д. насоса;

$\eta_{\text{пер}}$ — к. п. д. передач между насосом и двигателем.

Производительность поршневых насосов можно определить по формуле:

$$Q = k\frac{\pi D^2 ln}{4 \cdot 60} м^3/сек,$$

где k — коэффициент заполнения цилиндра водой (обычно $k=0{,}9$);

l — длина поршня в $м$;

D — диаметр поршня в $м$;

n — число ходов в минуту при одностороннем действии.

Полная высота подачи воды (расчетная) равна:

$$H = h_{\text{в}} + h_{\text{н}} + h_{\text{т}},$$

где $h_{\text{в}}$ — высота всасывания;

$h_{\text{н}}$ — высота нагнетания;

$h_{\text{т}}$ — высота, соответствующая потерям напора (определяется по справочным данным в метрах водяного столба на 100 *пог. м* длины труб).

5. Компрессоры. Мощность двигателя компрессора подсчитывается по формуле:

$$P = \frac{AQ}{102\eta_{\text{нас}}\eta_{\text{пер}}},$$

где A — величина работы, необходимой для сжатия 1 $м^3$ воздуха до заданного давления, в $кГм$;

Q — производительность компрессора в $м^3/сек$.

Мы разобрали несколько примеров подсчета мощности двигателей для различных исполнительных механизмов при длительной неизменной или мало меняющейся нагрузке.

По расчетной мощности и каталогу находят двигатель, мощность которого соответствует данной нагрузке.

В табл. 18 приведены основные системы электроприводов, их практическое применение и диапазоны регулирования скоростей вращения.

Таблица 18

Основные системы электроприводов

Наименование системы	Характер и диапазон регулирования	Область применения
Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором:		
с нормальным скольжением	Нерегулируемые	Приводы малой и средней мощности, не требующие регулирования скорости при малой частоте включения
с повышенным скольжением	Нерегулируемые	То же, при значительной частоте включения, а также привод с маховиком
с переключением числа полюсов	Ступенчатое регулирование, не выше 6 : 1	Приводы, допускающие ступенчатое электрическое регулирование скорости (например, некоторые металлургические станки малой мощности и прессы)
Асинхронные двигатели с контактными кольцами	Относительно плавное при постоянном моменте нагрузки, не выше 2 : 1	Приводы кранов, металлургических вспомогательных вентиляторов, дымососов
Реостатное регулирование	Относительно плавное при вентиляторном моменте нагрузки, 4 : 1 и выше	
Двигатели постоянного тока с параллельным возбуждением, питаемые от сети постоянного напряжения	Плавное, не выше 4 : 1	Главным образом для электропривода металлорежущих станков
Двигатели параллельного возбуждения, питаемые по схеме Г-Д	Плавное, 100 : 1 и выше	Для механизмов, требующих большого диапазона регулирования скорости или частого реверса (например, металлорежущие станки, реверсивные прокатные станы, бумагоделательные машины и т. п.)
Двигатели параллельного возбуждения при питании от ионного преобразователя	Плавное, не выше 60 : 1	Нереверсивные прокатные станы и некоторые металлорежущие станки с электрическим регулированием скорости
Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения	Относительно плавное, не выше 3 : 1	На кранах, где требуются высокая точность и малая скорость при жестких характеристиках; широко применяются для электрической тяги
Синхронные двигатели	Нерегулируемые	Крупные компрессоры и насосы, двигатели-генераторы, главный привод непрерывных нерегулируемых прокатных станов, средние и крупные приводы бумажной и цементной промышленности

§ 189. Защита электрических двигателей

Во время работы электрических двигателей возможны различные нарушения нормального режима работы. В этом случае во избежание порчи изоляции двигателя и нарушения целости обмоток и электрических соединений двигатели должны иметь защитные устройства, обеспечивающие своевременное отключение их от сети.

Наиболее частыми причинами ненормальных режимов работы двигателя являются перегрузки, короткие замыкания, понижение или исчезновение напряжения.

Перегрузкой называется увеличение тока двигателя сверхноминальной величины. Перегрузки могут быть небольшие и кратковременные. Они безопасны для двигателя, и защита на них не должна реагировать. Перегрузки могут быть чрезмерные и длительные — они опасны для обмоток двигателя, так как большое количество тепла, выделяемое током, может обуглить изоляцию и сжечь обмотки.

Также опасны для двигателя короткие замыкания, которые могут происходить в его обмотках. Защита двигателей от перегрузок и коротких замыканий называется максимальной токовой защитой. Максимальная защита осуществляется плавкими предохранителями, токовыми реле, тепловыми (термическими) реле. Выбор тех или иных защитных устройств зависит от мощности, типа и назначения двигателя, пусковых условий и характера перегрузок.

§ 190. Защита электродвигателей плавкими предохранителями

Плавкие предохранители представляют собой приспособления с легкоплавкой проволокой, изготовленной из меди, цинка или свинца и укрепленной на изолирующем основании. Назначение предохранителей заключается в отключении потребителя (части осветительной установки, двигателя и т. п.) от сети при недопустимо большой перегрузке или коротком замыкании. При этом большое количество тепла расплавляет плавкую вставку предохранителя и тем самым разрывается электрическая цепь. Являясь наиболее распространенными защитными приспособлениями, плавкие предохранители в то же время очень несовершенны.

Плавкие предохранители имеют относительно малую предельно-отключающую мощность. Наибольшая мощность, которую могут отключить предохранители или какой-либо отключающий аппарат (например, масляный выключатель, автоматический выключатель) без опасности быть поврежденным или разрушенным, называется предельно-отключающей мощностью.

Сгорание вставки предохранителя сопровождается выделе-

нием пламени и горячих газов, могущих служить причиной ожогов, ослепления людей и возникновения пожаров.

Плавкие предохранители могут выдерживать перегрузку в течение неограниченного времени на 25%, в течение одного часа — на 60% и приблизительно двух минут — на 80%.

Таким образом, плавкие предохранители не могут защищать двигатель от небольших и длительных перегрузок, при этом двигатель может выйти из строя, в то время как плавкая вставка предохранителя останется целой. Только при внезапных больших перегрузках или коротких замыканиях предохранители могут быстро отключать двигатели.

Казалось бы, что, выбирая предохранитель на ток, меньший номинального тока электродвигателя, можно защитить последний от перегрузки. На самом деле это не так. Известно, что пусковой ток двигателя значительно превышает номинальный ток (например, пусковой ток асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в 5—7 раз превышает его номинальный ток). Предохранители, выбранные на малый ток, будут сгорать в момент пуска двигателя.

Для выбора тока плавкой вставки предохранителя на практике пользуются следующим выражением:

$$I_в \geqslant \frac{I_п}{2{,}5},$$

где $I_в$ — ток плавкой вставки;

$I_п$ — пусковой ток двигателя;

$\geqslant$ — знак, означающий равно или больше.

Приведенное выражение пригодно для двигателей, разгон которых длится не более 5—10 сек. (нормальные условия пуска). Если пуск длится 30—40 сек. (тяжелые условия пуска), выбор тока предохранителя производится из условия

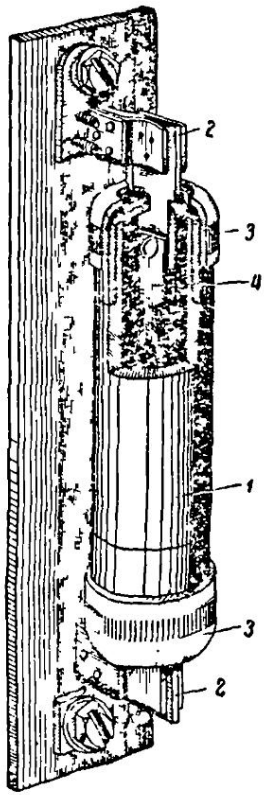
$$I_в \geqslant \frac{I_п}{1{,}6 \div 2}.$$

Плавкие предохранители бывают пробочные, пластинчатые и трубчатые. Пробочные предохранители изготовляются на напряжение до 500 *в* и на токи от 2 до 60 *а* и применяются для защиты осветительных сетей и электродвигателей малой мощности.

Пластинчатые предохранители, обладающие большими недостатками (разбрызгивание металла вставки при перегорании, трудность замены их), в настоящее время стараются не применять.

Трубчатые предохранители низкого напряжения изготовляются на напряжение до 500 *в* и на токи от 6 до 1000 *а*. Конструктивно трубчатые предохранители могут быть выполнены

с открытой фарфоровой трубкой (типа СПО) и с закрытой стеклянной, фибровой или фарфоровой трубкой. Трубки с пропущенными сквозь них плавкими вставками часто засыпают кварцевым песком (тип ПН — предохранитель насыпной). В момент перегорания предохранителя песок разбивает электрическую дугу на ряд мелких дуг, хорошо охлаждает дугу и она быстро гаснет.



Фиг. 384. Трубчатый предохранитель

Наиболее широкое применение на практике получили трубчатые газогенерирующие предохранители *ПР* (фиг. 384), состоящие из фибровой трубки *1*, закрытой с двух сторон латунными колпачками *3*. Внутри трубки располагается плавкая вставка *4* из цинкового сплава. Предохранитель вставляется в контакты *2*.

Действие предохраиителя ПР заключается в том, что в момент перегорания вставки под действием высокой температуры дуги часть внутренней поверхности фибровой трубки разлагается, выделяющийся при этом газ с большим содержанием водорода при высоком давлении производит деионизацию электрической дуги и она быстро гаснет.

Предохранители ПР обладают большой отключающей способностью и безопасны в эксплуатации.

Под отключающей способиостью аппарата подразумевают предельно-отключающую мощность, которую может отключить данный аппарат.

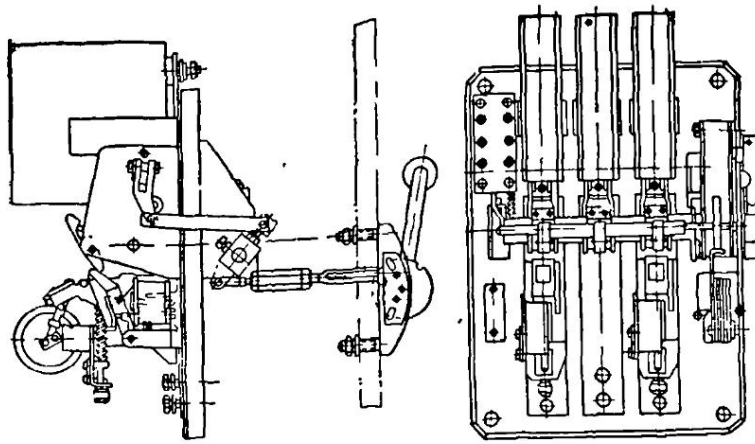
§ 191. Защита электродвигателей автоматическими выключателями

В электрических цепях постоянного и переменного тока напряжением до 500 *в* применяются автоматические воздушные выключатели или просто автоматы.

Назначение автоматов заключается в размыкании электрических цепей при перегрузке или коротких замыканиях.

В цепях переменного тока применяются автоматы серии А-2000, в цепях постояниого тока — автоматы серии АВ-45-1. Отдельные типы автоматов отличаются один от другого номнальным током.

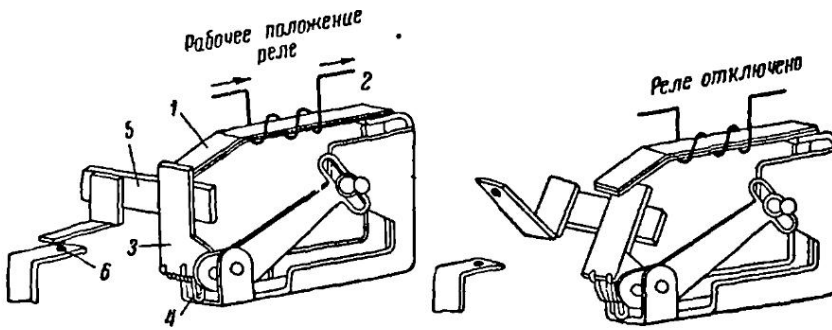
Автоматы бывают одно-, двух- и трехполюсные с ручным и дистанционным управлением. Общий вид автомата А-2050 показан на фиг. 385.



Фиг. 385. Общий вид автоматического воздушного выключателя

§ 192. Защита электродвигателей тепловыми реле

Принцип действия теплового реле с биметаллической пластиной был рассмотрен нами в § 53. На фиг. 386 показана схема устройства теплового реле, встраиваемого в магнитные пускатели (см. § 198).



Фиг. 386. Схема устройства теплового реле

Основной деталью реле является биметаллическая пластина *1*. Под действием тепла нагревательного элемента *2* происходит деформация биметаллической пластины, которая, изгибаясь, освобождает защелку *3*. Под действием пружины *4* защелка поворачивается вокруг оси и при помощи тяги *5* производит размыкание нормально замкнутых контактов *6* вспомогательной цепи реле. Возвращение защелки в первоначальное положение производится при помощи кнопки возврата.

Имеются конструкции тепловых реле, в которых биметаллическая пластина нагревается рабочим током двигателя.

Тепловые реле с биметаллическими пластинами изготовляются на токи от 0,5 до 600 *а*.

Нагревательный элемент теплового реле выбирается по номинальному току двигателя.

Тепловые реле защищают двигатели от перегрузок, но не могут отключить двигатель при коротком замыкании. Это объясняется тем, что короткие замыкания в двигателе необходимо отключать мгновенно, в то время как для нагрева биметаллической пластины требуется некоторое время.

На работу теплового реле большое влияние оказывает внешняя температура. Поэтому для правильной работы теплового реле оно должно находиться в таких же температурных условиях, что и защищаемый электродвигатель, т. е. реле нужно устанавливать рядом с двигателем в том же помещении.

§ 193. Аппаратура управления электродвигателями

Управление электродвигателями напряжением до 500 *в* может производиться вручную, полуавтоматически и автоматически.

Ручное управление заключается в замыкании цепи двигателя рубильником или выключателем.

При полуавтоматическом управлении включение двигателя производится аппаратами, цепи включения которых замыкаются нажатием кнопки.

Автоматическое управление механизмом производится или самим исполнительным механизмом, или при помощи специального механизма, который в нужный момент включает или отключает двигатель.

Для управления электродвигателями применяется различная аппаратура управления.

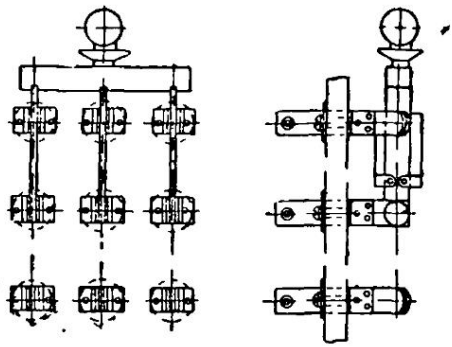
§ 194. Рубильники, переключатели, пакетные выключатели

Для ручного управления электродвигателями в цепях постоянного и переменного тока напряжением до 500 *в*, как указывалось, применяются рубильники и переключатели. По числу ножей рубильники и переключатели бывают одно-, двух- и трехполюсные.

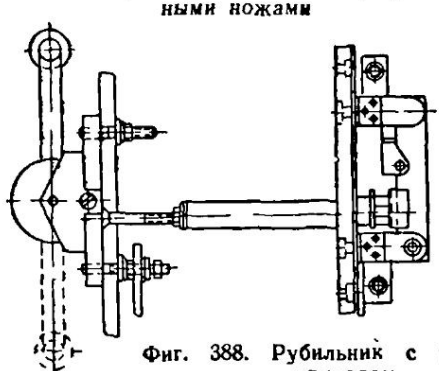
Управление рубильниками и переключателями может производиться при помощи рукоятки или рычажного привода. В первом случае рубильники устанавливаются на лицевой стороне щита, а во втором — сзади щита, причем управление ими произ-

водится рукояткой рычажного привода, устанавливаемой на передней стороне щита.

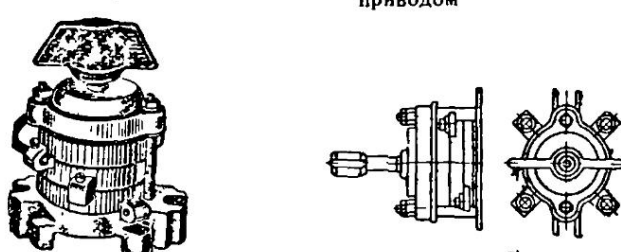
Двух- или трехполюсный рубильник без разрывных ножей с



Фиг. 387. Переключатель с разрывными ножами



Фиг. 388. Рубильник с рычажным приводом



а) *б*)

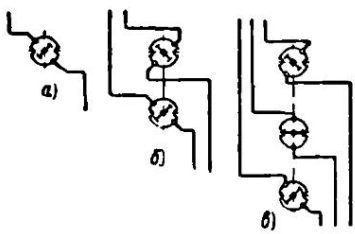
Фиг. 389. Пакетный выключатель (*а* — общий вид и *б* — чертеж)

рукояткой состоит из двух или трех ножей, связанных между собой изолирующей траверсой с рукояткой. Каждый нож шарнирно поворачивается в нижней контактной пружине. При включении ножи своей верхней частью входят в верхнюю контакт-

ную пружину, а при отключении они при помощи специального приспособления удерживаются в горизонтальном положении.

Рубильник с разрывными ножами, кроме главных ножей, имеет дополнительные ножи, связанные с главными ножами при помощи пружин. В момент отключения из верхних контактных пружин выходят сначала главные ножи, затем под действием пружин быстро отключаются разрывные ножи. Появившаяся в месте разрыва электрическая дуга быстро гаснет, и ножи меньше обгорают.

По условиям техники безопасности при напряжении 380 и 500 *в* рубильники должны иметь защитный кожух или управляться рычажным приводом.



Фиг. 390. Схема включения пакетных выключателей

Рубильники с рукояткой выпускаются следующих типов: РО-3 (на 100—400 *а*), РО-5 (на 600—1000 *а*), РО-7 (на 1500 *а*). Переключатели с рукояткой выпускаются таких типов: ПО-3 (на 100—400 *а*) и ПО-5 (на 100—600 *а*). Рубильники и переключатели с рычажным приводом выпускаются типов РПО-3, РПО-5, ППО-3 и ППО-5 на токи 100—1000 *а*.

На фиг. 387 показан переключатель с разрывными ножами, а на фиг. 388 — рубильник с рычажным приводом.

Для ручного включения и отключения электрических цепей постоянного тока напряжением до 250 *в* и переменного тока напряжением до 380 *в* применяются пакетные выключатели ПК (фиг. 389). Выключатель состоит из отдельных круглых пакетов, выполненных из изоляционного материала (карболита). Внутри пакета вращается подвижный контакт, производящий замыкание и размыкание цепи. Несколько пакетов собирается вместе и стягивается шпильками.

Пакетные выключатели выполняются одно-, двух- и трехполюсными на токи от 6 до 100 *а*.

Схемы включения одно-, двух- и трехполюсного пакетных выключателей показаны на фиг. 390, *а, б, в*.

§ 195. Контакторы

Для дистанционного и автоматического управления электродвигателями применяются контакторы. В зависимости от рода тока контакторы бывают постоянного и переменного тока.

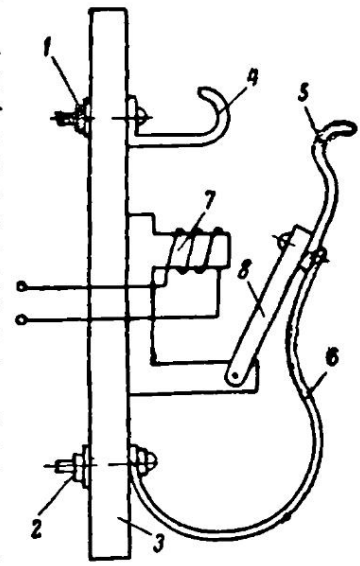
Схема контактора постоянного тока представлена на фиг. 391. Силовая цепь, замыкаемая контактором, проходит через контакты *1* и *2*, укрепленные на изолирующем основании *3*, контакты самого контактора *4* и *5* и гибкую токоведущую связь *6*. За-

мыкание контактора осуществляется электромагнитом *7*, обмотка которого питается от вспомогательной цепи управления. При замыкании цепи управления электромагнит притягивает якорь *8*, который замыкает контакты контактора.

Контактор удерживается во включенном положении до тех пор, пока замкнута цепь обмотки электромагнита. Контакторы постоянного тока КП строятся с одним, двумя и тремя главными контактами, работающими в цепях постоянного тока напряжением 220, 440 и 600 *в*. Номинальные токи, на которые рассчитаны главные контакты, бывают от 20 до 250 *а*. Катушки электромагнитов контакторов КП рассчитаны на напряжения 48, 110 и 220 *в*.

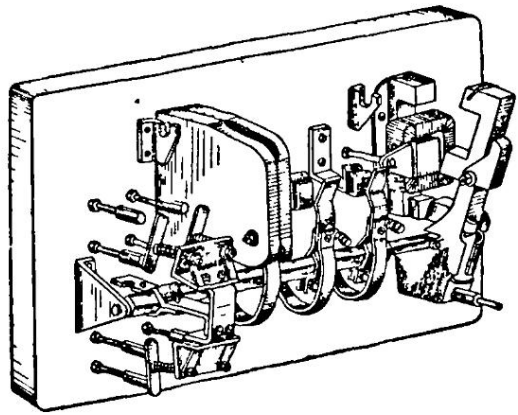
Кроме главных контактов, служащих для замыкания и размыкания силовых цепей, контакторы снабжаются блок-контактами для цепей сигнализации и других целей.

Контакторы КП допускают до 240—1200 включений в час.



Фиг. 391. Схема контактора постоянного тока

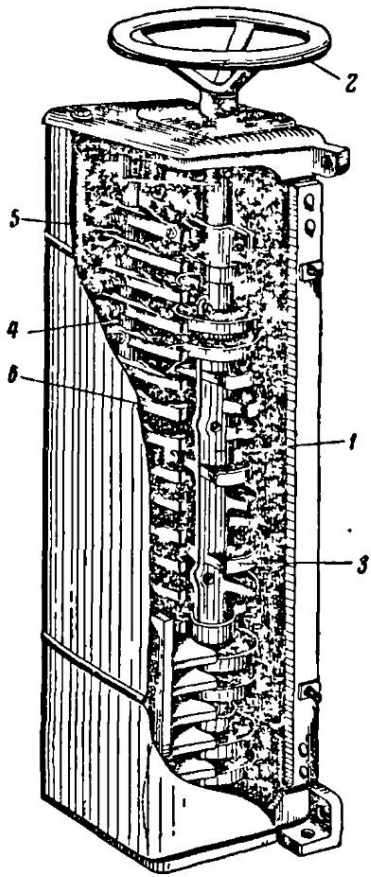
Схема контактора переменного тока КТ показана на фиг. 392. Включающие катушки контакторов КТ изготовляются на напряжения 127, 220, 380 и 500 *в* при частоте 50 *гц*. Контакторы КТ допускают до 120 включений в час.



Фиг. 392. Контактор переменного тока

§ 196. Контроллеры

Для пуска двигателей, изменения направления вращения, регулирования скорости и остановки двигателей применяют аппараты, называемые контроллерами. По роду тока контроллеры бывают постоянного и переменного тока. Контроллеры, контакты которых включаются в силовые цепи электродвигателей, называются силовыми контроллерами.



Фиг. 393. Барабанный контроллер: *1* — вал, *2* — штурвал, *3* — медная пластинка, *4* — неподвижные контакты, *5* — изолирующие планки, *6* — медные сухари

Имеются контроллеры, которые замыкают цепи управления электромагнитных аппаратов (например, контакторов), а они, в свою очередь, замыкают и размыкают силовые цепи электродвигателей. Такие контроллеры называются командо-контроллерами.

В зависимости от конструкции контактной системы контроллеры могут быть барабанные и кулачковые.

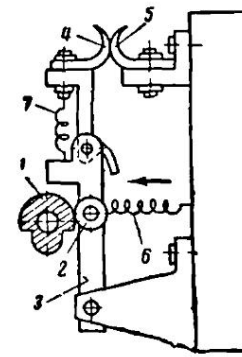
На фиг. 393 показан барабанный контроллер. Вал контроллера *1* поворачивается при помощи штурвала *2* (рукоятки, маховика). На валу изолированно от него укреплены медные пластины *3*, имеющие форму сегментов и являющиеся подвижными контактами. Сегменты могут быть разной длины и смещены один относительно другого на некоторый угол. Некоторые сегменты электрически соединяются между собой. При повороте вала контроллера его сегменты соединяются с неподвижными контактами *4*, укрепленными на изолирующей планке *5*. Неподвижные контакты пальцевого типа (пальцы) оканчиваются легко сменяемыми «сухарями» *6*. В результате соединения подвижных контактов с неподвижными производятся необходимые переключения в управляемой цепи.

Во избежание перебрасывания электрической дуги с одного пальца на другой они разделяются асбоцементными перегород-

ками. Для гашения дуги контроллеры снабжаются дугогасительной катушкой. Действие ее основано на взаимодействии проводника с током и магнитного поля. В момент образования дуги она оказывается в магнитном поле катушки. При этом создается усилие, заставляющее дугу отклоняться в сторону, вследствие чего она удлиняется, интенсивно охлаждается и гаснет.

Кулачковый контроллер состоит из комплекта контакторных элементов, замыкающихся и размыкающихся при помощи кулачковых шайб, расположенных на валу контроллера.

Схематическое устройство контактной системы кулачкового контроллера показано на фиг. 394.



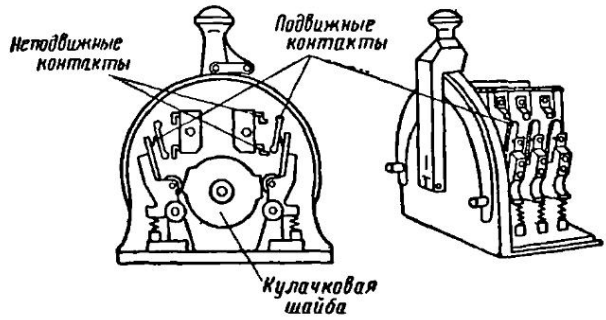
Фиг. 394. Схема устройства кулачкового контроллера:

1 — кулачковая шайба, *2* — ролик, *3* — рычаг, *4, 5* — контакты, *6* — приводная пружина, *7* — нажимная пружина

При повороте вала контроллера кулачковая шайба *1*, сидящая на валу, поворачивается на некоторый угол и давит на ролик *2*, шарнирно укрепленный на рычаге *3*. Поворот рычага (на фиг. 394 вправо) приводит к замыканию контактов *4* и *5*. В момент соприкосновения контактов подвижный контакт, перекатываясь, начинает скользить по неподвижному. Происходит так называемое притирание контактов, снимающее окись с контактных поверхностей. Приводная пружина *6* прижимает ролик к поверхности кулачковой шайбы. Взаимное прижатие контактов обеспечивается нажимной пружиной *7*.

Для лучшего гашения дуги каждый контактный элемент контроллера снабжен индивидуальным приспособлением для гашения дуги.

Контакты кулачковых контроллеров имеют большую разрывную мощность, чем контакты барабанных контроллеров, и допускают большее число включений (до 600 включений в час).

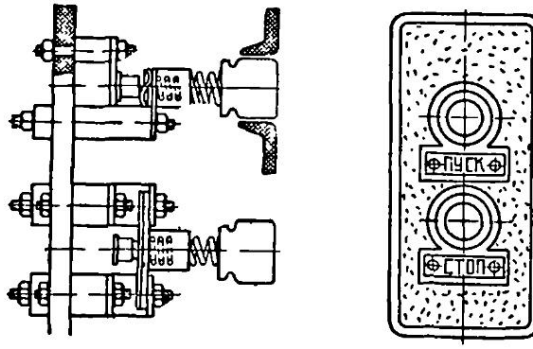


Фиг. 395. Командо-контроллер

На фиг. 395 показан командо-контроллер (командо-аппарат) серии КА-5000. Принцип работы командо-контроллера аналогичен принципу работы кулачкового контроллера. Командо-контроллеры имеют от 2 до 14 главных цепей и от 1 до 7 рабочих положений.

§ 197. Кнопки управления

Для дистанционного управления электромагнитными аппаратами и для цепей сигнализации применяются кнопки управления КУ-121. Кнопочные станции комплектуются из 1, 2 и 3 кнопочных элементов. Каждый кнопочный элемент имеет один нормально открытый контакт и один нормально закрытый контакт. Нормальным положением контактов условно называется такое положение, когда внешнее воздействие на кнопки отсутствует.



Фиг. 396. Кнопки управления

Номинальное напряженне, на которое рассчитано применение кнопок управления, не должно превышать 440 *в* на постоянном токе и 500 *в* на переменном токе. На фиг. 396 показана кнопочная станция на два кнопочных элемента.

§ 198. Магнитные пускатели

Магнитные пускатели представляют собой электромагнитные аппараты, служащие для дистанционного (на расстоянии) управления трехфазными асинхронными двигателями. Магнитные пускатели имеют две цепи: основную — силовую и вспомогательную — цепь управления.

Силовая цепь состоит из плавких предохранителей, линейных контактов, нагревательных элементов тепловых реле.

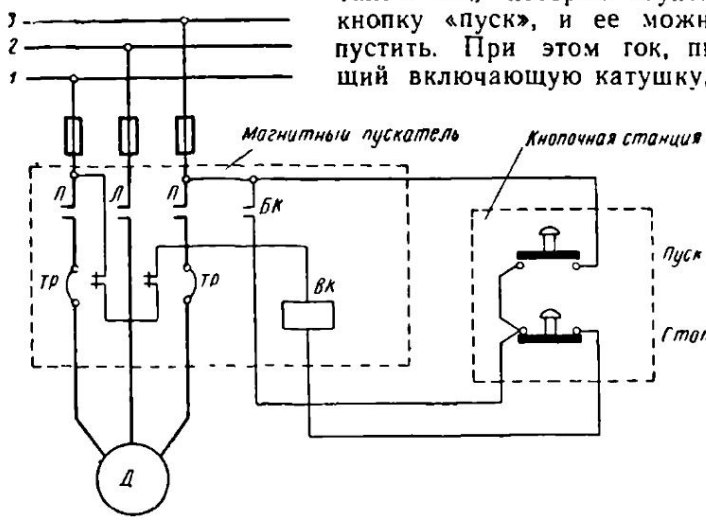
По силовой цепи электрическая энергия трехфазного тока поступает в обмотку статора управляемого двигателя.

Цепь управления пускателя состоит из кнопочной станции на две кнопки — «пуск» и «стоп», включающей катушки пускателя, блок-контакта и контактов тепловых реле. Цепь управления служит для управления самим пускателем.

На фиг. 397 дана схема нереверсивного магнитного пускателя (типа ПМ), управляемого от кнопочной станции.

Работает пускатель следующим образом: при нажатии кнопки «пуск» ток из первой фазы проходит через кнопку «пуск», по

перемычке, через кнопку «стоп», включающую катушку *ВК*, контакты тепловых реле *ТР* и приходит на третью фазу. Катушка втягивает якорь, главные линейные контакты *Л* замыкаются, двигатель получает напряжение и начинает вращаться. При включении главных контактов *Л* одновременно замыкаются блок-контакты *БК*, которые шунтируют кнопку «пуск», и ее можно отпустить. При этом ток, питающий включающую катушку, про-



Фиг. 397. Схема нереверсивного магнитного пускателя:
Л — главные линейные контакты, *ТР* — тепловые реле, *БК* — блок-контакты, *ВК* — катушка включающего электромагнита, *Д* — электродвигатель

ходит от первой фазы через блок-контакты *БК*, кнопку «стоп» и т. д. Останов двигателя происходит путем нажатия кнопки «стоп». При этом линейные контакты размыкаются и двигатель останавливается. Защита двигателя от перегрузки осуществляется тепловыми реле, нагревательные элементы которых выбираются в соответствии с номинальным током двигателя. При протекании по обмотке двигателя тока, превышающего номинальный, тепловые реле размыкают свои контакты, что приводит к разрыву цепи, включающей катушки, линейные контакты размыкаются и двигатель автоматически останавливается.

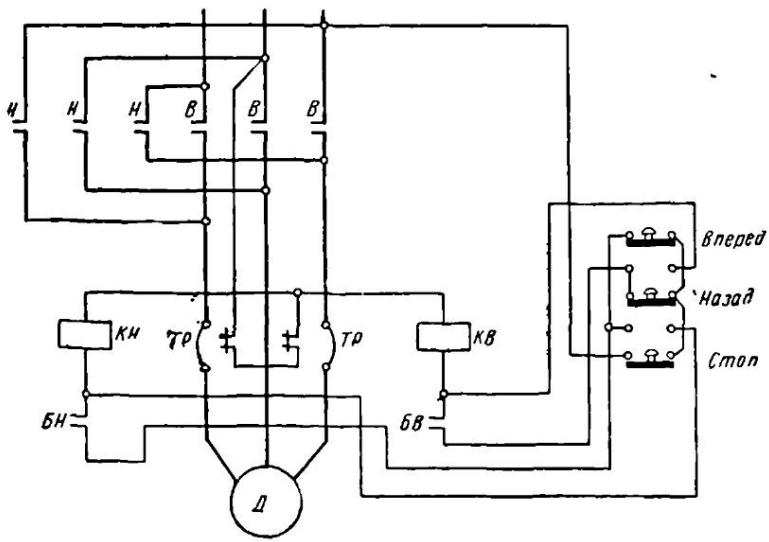
Для возвращения контактов тепловых реле в исходное положение служит кнопка «возврата».

После выключения пускателя под действием теплового реле до его включения должно пройти от 0,5 до 3 мин. Этого времени будет достаточно, чтобы охладить биметаллическую пластину теплового реле и частично обмотку двигателя.

Катушка пускателя рассчитана для работы при напряжении от 85 до 100% номинальиого. Минимальное напряжение, при

котором катушка надежно удерживает пускатель во включенном положении, на 50—60% ниже номинального. При резком падении или полном исчезновении напряжения сети катушка пускателя автоматически разомкнет главные контакты, осуществляя тем самым выключение двигателя.

Плавкие предохранители, устанавливаемые отдельно перед пускателем, защищают сеть от коротких замыканий в двигателе.



Фиг. 398. Схема реверсивного магнитного пускателя

Для реверсивных двигателей (меняющих направление вращения) устанавливаются реверсивные магнитные пускатели (типа ПМР).

Схема такого пускателя дана на фиг. 398.

В реверсивном магнитном пускателе есть два контактора: один для пуска двигателя «вперед», другой на обратный ход — «назад». Пускатель имеет две катушки: *КВ* — катушка включения «вперед» и *КН* — катушка включения «назад».

Кнопочная станция имеет соответственно три кнопки: «вперед», «назад» и «стоп».

Оба контактора пускателя имеют механическую и электрическую блокировку с тем, чтобы при включении одного не мог быть включен другой. Последняя блокировка выполняется контактами кнопочной станции, которые нормально замкнуты кнопками «вперед» и «назад». Назначение тепловых реле *ТР*, контактов тепловых реле, блок-контактов то же, что и у нереверсивных пускателей.

Рассмотрим работу реверсивного магнитного пускателя. При

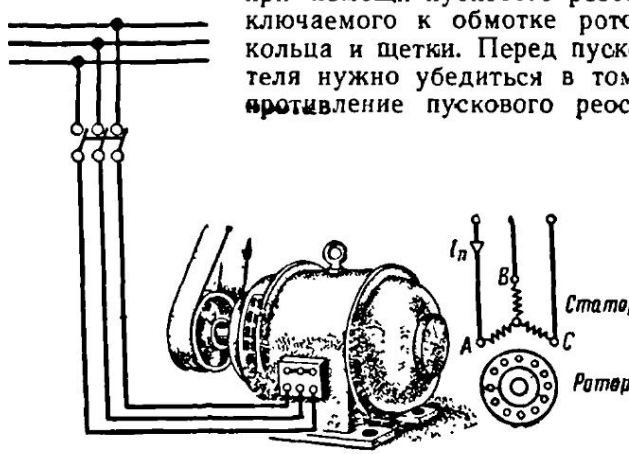
нажатии, например, кнопки «вперед» ток от одной фазы проходит через кнопку «стоп», затем через кнопку «назад», включающую катушку «вперед» — *КВ*, далее через контакты тепловых реле — *ТР* на другую фазу. Включающая катушка *КВ* возбуждается и замыкает линейные контакты «вперед». Одновременно включается блок-контакт *БВ* и шунтирует кнопку «вперед», которую можно теперь отпустить. Двигатель получает напряжение и начинает вращаться. Следует обратить внимание на то, что, когда мы нажимаем кнопку «вперед», ток проходит через кнопку «назад» и наоборот. Тем самым осуществляется электрическая блокировка. Изменение направления вращения (реверс) происходит при замыкании контактора «назад», который меняет местами две крайние фазы.

§ 199. Способы пуска асинхронных двигателей

Пуск асинхронных двигателей можно производить при полном напряжении (прямой пуск) и при пониженном напряжении.

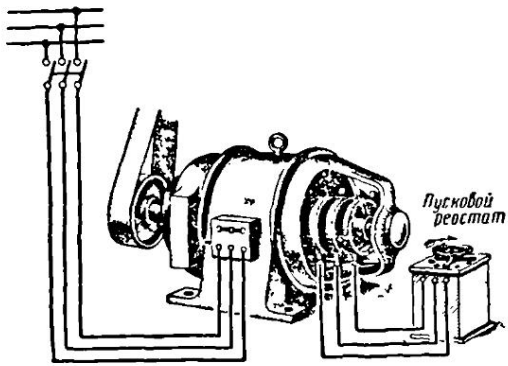
Прямой пуск осуществляется при помощи рубильников, переключателей, пакетных выключателей, магнитных пускателей, контакторов и контроллеров. При прямом пуске к двигателю подается полное напряжение сети. Недостатком этого способа пуска являются большие пусковые токи, которые в 2—7 раз больше номинальных токов двигателей.

Наиболее простым является прямой пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Пуск и останов таких двигателей производится включением или отключением рубильника (магнитного пускателя) и т. п. На фиг. 399 показана схема прямого пуска асинхронного короткозамкнутого двигателя. Пуск асинхронных двигателей с фазным ротором производится при помощи пускового реостата, подключаемого к обмотке ротора через кольца и щетки. Перед пуском двигателя нужно убедиться в том, что сопротивление пускового реостата пол-



Фиг. 399. Прямой пуск асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

ностью введено. В конце пуска реостат плавно выводится и закорачивается. Наличие активного сопротивления в цепи ротора при пуске приводит к уменьшению пускового тока и увеличению пускового момента. На фиг. 400 дана схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором.

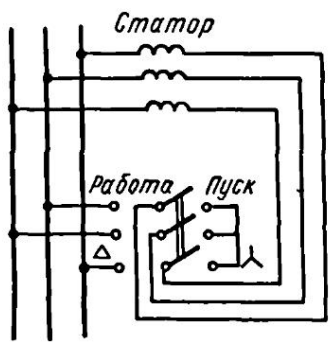


Фиг. 400. Схема пуска асинхронного двигателя с фазным ротором

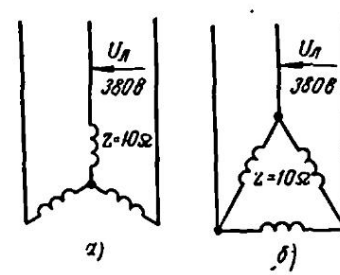
Для уменьшения пусковых токов асинхронных двигателей уменьшают напряжение, подводимое к обмоткам статора двигателя.

Рассмотрим два способа пуска асинхронных двигателей при понижении напряжения: с помощью переключателя со звезды на треугольник и с помощью автотрансформатора.

Пуск при помощи переключателя со звезды на треугольник. На фиг. 401 дана принципиальная схема включения обмотки статора с переключателем со звезды на треугольник. При пуске обмотка статора с помощью рубильника соединяется звездой и, как только двигатель разовьет максимально возможную для этого соединения скорость вращения, рубильник откидывается влево, обмотка статора оказывается включенной треугольником и двигатель получает возможность развить полную скорость. При этом способе пуска двигателя пусковой ток уменьшается в три раза. Поясним это на примере.



Фиг. 401. Переключение обмотки статора со звезды на треугольник при пуске двигателя



Фиг. 402. Включение обмотки статора двигателя:
а — звездой, *б* — треугольником

На фиг. 402, *а* схематически изображена обмотка статора, соединенная при пуске звездой. Пусть напряжение между линейными проводами двигателя равно 380 *в*, а следовательно, напряжение, приходящееся на фазу двигателя при пуске, будет:

$$U_{\Phi Y} = \frac{U_{\text{л}Y}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1{,}73} = 220 \text{ в}.$$

Так как кажущееся сопротивление фазной обмотки двигателя равно 10 *ом*, то ток фазы будет:

$$I_{\Phi Y} = \frac{U_{\Phi Y}}{z} = \frac{220}{10} = 22 \text{ а}.$$

При соединении звездой $I_{\text{л}Y} = I_{\Phi Y}$. Поэтому ток, потребляемый двигателем в конце пуска (без учета пусковых токов), будет также равен 22 *а*.

На фиг. 402, *б* схематически показан тот же двигатель, если обмотка его соединена треугольником и включена на линейное напряжение 380 *в*. В этом случае $U_{\text{л}\Delta} = U_{\Phi\Delta}$, а поэтому ток фазы двигателя будет:

$$I_{\Phi\Delta} = \frac{U_{\Phi\Delta}}{z} = \frac{380}{10} = 38 \text{ а}.$$

Так как при соединении треугольником

$$I_{\text{л}\Delta} = I_{\Phi\Delta}\sqrt{3},$$

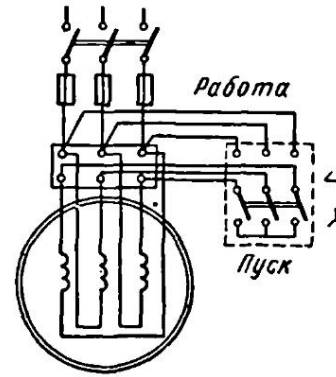
то двигатель в этом случае будет потреблять из сети линейный ток:

$$I_{\text{л}\Delta} = 38 \cdot \sqrt{3} = 66 \text{ а}.$$

Как видно из приведенного примера, линейный ток двигателя при соединении обмоток статора звездой в три раза меньше линейного тока двигателя, статорная обмотка которого соединена треугольником.

На фиг. 403 показана схема включения переключателя со звезды на треугольник в цепи статора асинхронного двигателя.

Рассмотренный нами способ пуска двигателя уменьшает пусковой ток в три раза, а так как согласно доказанному выше момент двигателя пропорционален току ротора и, стало быть, приближенно и току статора, то одновременно пусковой момент двигателя уменьшается также в три раза. Поэтому двигатели

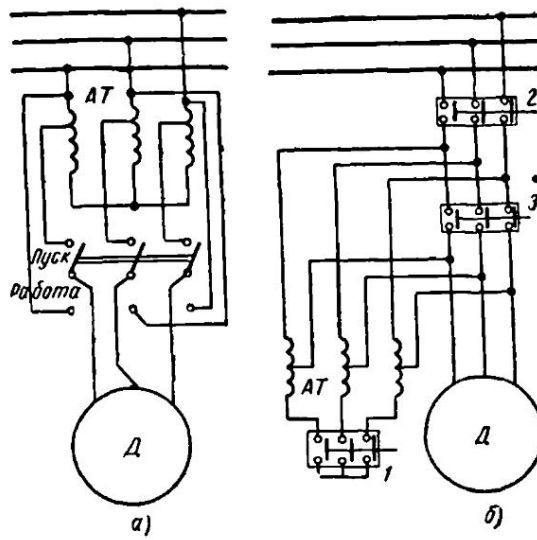


Фиг. 403. Схема включения в цепь статора асинхронного двигателя переключателя со звезды на треугольник

с таким способом пуска можно применять только в тех случаях, когда их пускают вхолостую или слабо нагруженными.

Само собой разумеется, что переключение обмотки статора со звезды на треугольник при пуске можно применять только для двигателей, нормально работающих по схеме треугольник.

Пуск при помощи автотрансформатора. Уменьшить напряжение, подводимое к двигателю, а вместе с этим уменьшить пусковой ток двигателя можно также при помощи автотрансформатора. На фиг. 404, *а* показана схема пуска низковольтного асин-



Фиг. 404. Пуск с помощью автотрансформатора: *а* — низковольтного двигателя, *б* — высоковольтного двигателя

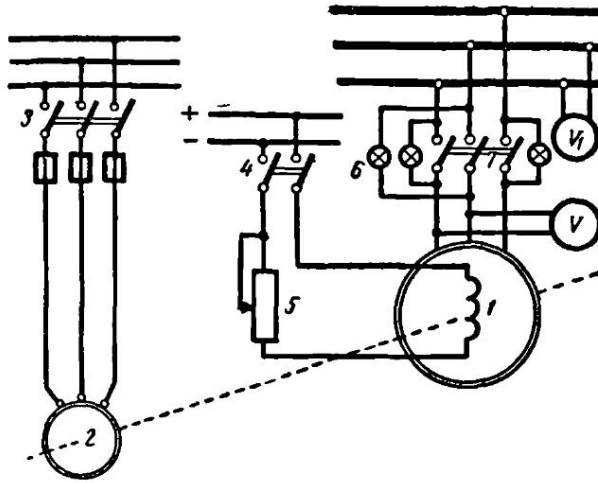
хронного двигателя *Д* при помощи автотрансформатора *АТ*. Фиг. 404, *б* изображает схему пуска высоковольтного двигателя. Здесь автотрансформатор *АТ* имеет размыкаемую нулевую точку. Для пуска двигателя *Д* в ход включают масляный выключатель *1*, замыкая тем самым нулевую точку автотрансформатора. Затем включают главный масляный выключатель *2*; к двигателю через автотрансформатор подается из сети пониженное напряжение, и двигатель трогается с места. При достижении двигателем максимально возможной (при данном соединении) скорости выключается масляный выключатель *1* и включается масляный выключатель *3*, отчего двигатель получает полное напряжение сети и развивает нормальную скорость вращения.

При пуске автотрансформаторы понижают напряжение на 50—80%.

§ 200. Способы пуска синхронных двигателей

Одним из главных недостатков синхронных двигателей является сложность их пуска в ход. Пуск синхронных двигателей может быть осуществлен при помощи вспомогательного пускового двигателя или путем асинхронного пуска.

Пуск синхронного двигателя при помощи вспомогательного двигателя. Если ротор синхронного двигателя с возбужденными полюсами развернуть другим, вспомогательным двигателем до скорости вращения поля статора, то магнитные полюсы статора, взаимодействуя с полюсами ротора, заставят ротор вращаться далее самостоятельно без посторонней помощи, в такт с полем статора, т. е. синхронно (откуда эти двигатели и получили свое название).



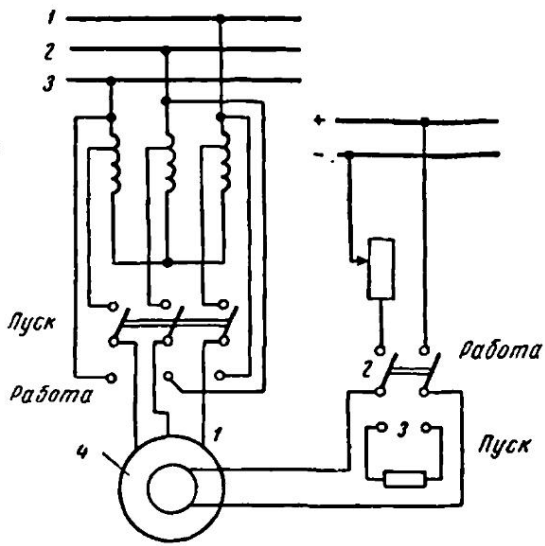
Фиг. 405. Схема пуска синхронного двигателя при помощи пускового двигателя

На фиг. 405 показана схема пуска синхронного двигателя *1* с помощью вспомогательного асинхронного двигателя *2*.

Для осуществления пуска необходимо, чтобы число пар полюсов асинхронного двигателя было меньше числа пар полюсов синхронного двигателя, ибо при этих условиях вспомогательный асинхронный двигатель может развернуть ротор синхронного двигателя до синхронной скорости.

Порядок пуска синхронного двигателя следующий. Включая рубильник *3*, пускают вспомогательный асинхронный двигатель *2*, который разворачивает ротор синхронного двигателя *1* до скорости, соответствующей скорости поля статора. Скорость вращения вспомогательного двигателя определяется по тахо-

метру [1]. Затем, включая рубильник *4* постоянного тока, возбуждают полюсы ротора. Чтобы включить синхроный двигатель в сеть трехфазного тока, его нужно синхронизировать так же, как и при включении синхронного генератора на параллельную работу. Для этого реостатом *5* устанавливают такое возбуждение, чтобы напряжение обмотки статора по вольтметру *V* было равно напряжению сети, указываемому вольтметром V_1. Электролампы *6*, включенные параллельно ножам рубильника *7* трехфазной сети, при разомкнутом рубильнике будут мигать. Сначала мигание будет частым, но если изменять скорость вращения вспомогательного асинхронного двигателя, то лампы будут мигать все реже и реже. Синхронный двигатель можно включить в сеть трехфазного тока рубильником *7* тогда, когда все три лампы одновременно погаснут. Ротор двигателя при этом входит в синхронизм и может далее вращаться самостоятельно. Теперь вспомогательный двигатель *2* рубильником *3* можно отключить от сети.



Фиг. 406. Схема асинхронного пуска синхронного двигателя при помощи автотрансформатора

Сложность пуска и необходимость вспомогательного двигателя являются существенными недостатками этого способа пуска синхронных двигателей. Поэтому в настоящее время он применяется редко.

Асинхроиный пуск синхроиного двигателя. Для осуществления этого способа пуска в полюсных наконечниках полюсов ротора укладывается дополнительная короткозамкнутая обмотка. Так как во время пуска в обмотке возбуждения *1* двигателя наводится большая э. д. с., то по соображениям безопасности она замыкается рубильником *2* на сопротивление *3* (фиг. 406).

При включении напряжения трехфазной сети в обмотку статора *4* синхронного двигателя возникает вращающееся магнитное поле, которое, пересекая короткозамкнутую (пусковую) об-

[1] Тахометр — прибор, измеряющий скорость вращения машины.

мотку, заложенную в полюсных наконечниках ротора, индуктирует в ней токи.

Эти токи, взаимодействуя с вращающимся полем статора, приведут ротор во вращение. При достижении ротором наибольшего числа оборотов (95—97% синхрониой скорости) рубильник *2* переключают так, чтобы обмотку ротора включить в сеть постоянного напряжения.

Недостатком асинхронного пуска является большой пусковой ток (в 5—7 раз больший рабочего тока). Пусковой ток вызывает падение напряжения в сети, а это отражается на работе других потребителей. Для уменьшения пускового тока применяют пуск при пониженном напряжении с помощью реактора[1] или автотрансформатора.

В настоящее время применяют почти исключительно асинхронный пуск синхронных двигателей ввиду его простоты и надежности. Существуют также схемы автоматического асинхронного пуска синхронных двигателей.

§ 201. Перемена направления вращения электрических двигателей (реверсирование)

Изменение направления вращения двигателей постоянного тока производится путем изменения направления тока в обмотке якоря, если остается прежним направление тока в обмотке возбуждения, или путем изменения направления тока в обмотке возбуждения, если остается прежним направление тока в обмотке якоря. Если же изменить одновременно направление тока в обмотке якоря и в обмотке возбуждения, то направление вращения двигателя не изменится.

Реверсирование двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением можно производить путем изменения направления тока либо в обмотке якоря, либо в обмотке возбуждения.

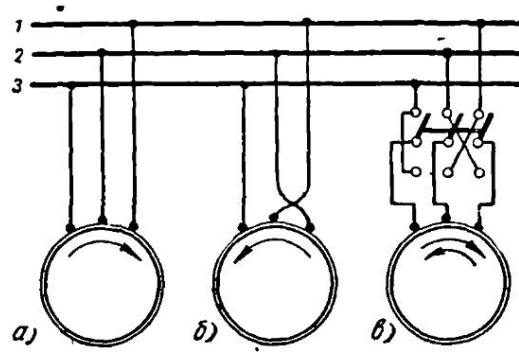
Реверсирование двигателей с параллельным и со смешаиным возбуждением производят путем изменения направления тока в обмотке якоря. Разрыв цепей параллельных обмоток возбуждения для изменения в них направления тока может привести к пробою их изоляции вследствие возникновения в них большой э. д. с. самоиндукции.

Направленне вращения ротора асинхронных двигателей зависит от направления вращения магнитного поля статора. Чтобы изменить направление вращения магнитного поля статора, нужно поменять местами два любых линейных провода, подходящих к обмотке статора двигателя.

На фиг. 407, *а* и *б* схематически изображен случай перемены направления вращения асинхронного двигателя. Перемена ме-

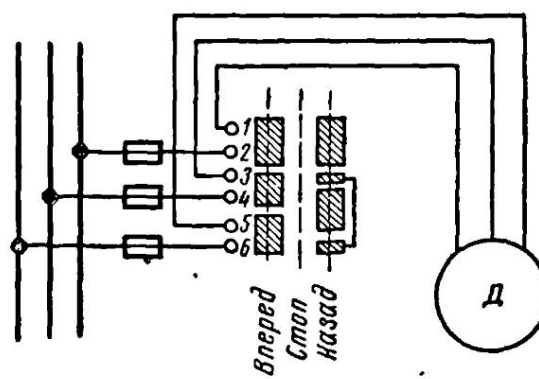
[1] Реактор — индуктивное сопротивление, выполненное в виде катушки без стального сердечника.

стами проводов, соединенных с какими-либо двумя фазами статора, меняет направление вращения ротора двигателя. Для этого к двигателю ставят переключатель (фиг. 407, *в*).



Фиг. 407. Перемена направления вращения асинхронного двигателя с помощью пересоединения проводов (*а, б*) и с помощью переключателя (*в*)

При дистанционном (на расстоянии) управлении двигателем, когда встречается необходимость перемены направления вращения, к двигателю ставят реверсивный магнитный пускатель.



Фиг. 408. Перемена направления вращения двигателя с помощью контроллера

Для двигателей большой мощности реверсирование (изменение направления вращения) выполняется с помощью особого аппарата — контроллера (фиг. 408). Здесь медные сегменты, укрепленные на барабане контроллера, при повороте барабана соединяются неподвижными контактами *1—6* и производят необходимые включения, выключения и переключения.

§ 202. Регулирование скорости вращения электрических двигателей

Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока можно производить путем изменения напряжения, подводимого к двигателю, или путем изменения величины магнитного потока двигателя.

Из формулы

$$n \approx \frac{U}{c\Phi}$$

видно, что скорость вращения двигателей постоянного тока пропорциональна величине напряжения U и обратно пропорциональна величине магнитного потока Φ.

Изменение величины напряжения, подводимого к якорю двигателя, можно производить путем включения последовательно с якорем двигателя переменного регулировочного сопротивления или путем последовательного и параллельного включения обмоток якорей нескольких двигателей. Последний способ нашел применение для регулирования скорости электрифицированного транспорта (трамваев, электровозов).

Наиболее часто для регулирования скорости применяют способ изменения величины магнитного потока двигателя. Для этой цели в цепь обмотки возбуждения двигателя включают реостат, дающий возможность производить широкую и плавную регулировку скорости двигателя.

Регулирование скорости вращения асинхронных двигателей производится одним из следующих способов.

1. **Изменение числа полюсов электродвигателя.** Для возможности изменения числа пар полюсов двигателя статор его выполняют либо с двумя самостоятельными обмотками, либо с одной обмоткой, которую можно пересоединять на различные числа полюсов.

На фиг. 409, *а* схематически показаны две катушки одной фазы, соединенные последовательно. Из чертежа видно, что катушки создают четыре магнитных полюса.

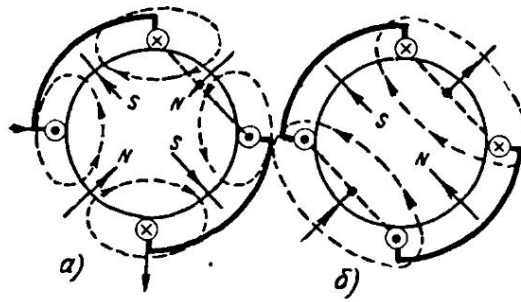
Те же две катушки, соединенные параллельно между собой, создадут уже только два полюса (фиг. 409, *б*). Пересоединение обмоток статора производится при помощи специального аппарата — контроллера. При этом способе регулировка скорости вращения двигателя совершается скачками.

На практике встречаются двигатели, синхронные скорости вращения которых могут быть равны 3000, 1500, 1000 и 750 оборотов в минуту.

Регулировку скорости вращения двигателя путем изменения числа полюсов можно производить только у асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Ротор с короткозамкну-

той обмоткой может работать с любым числом полюсов статора. Наоборот, ротор двигателя с фазной обмоткой может нормально работать лишь при определенном числе полюсов статора. Иначе обмотку ротора также пришлось бы переключать, что внесло бы большие усложнения в схему двигателя.

2. Изменение частоты переменного тока. При этом способе частоту переменного тока, подводимого к обмотке статора двигателя, изменяют при помощи специального генератора (преобразователя частоты). Регулировку изменением частоты тока вы-



Фиг. 409. Изменение числа пар полюсов на статоре электродвигателя

годно производить, когда имеется большая группа двигателей, требующих совместного плавного регулирования скорости вращения (рольганги, текстильные станки и т. п.).

3. Введение сопротивления в цепь ротора. Первые два способа регулировки скорости вращения асинхронного двигателя требуют или специального исполнения двигателя, или наличия специального генератора (преобразователя частоты) и поэтому широкого распространения не получили.

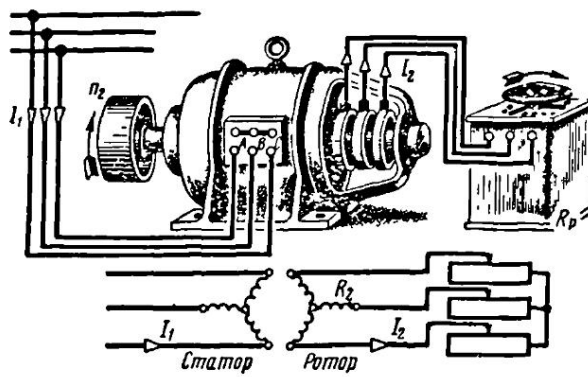
Третий способ регулировки скорости вращения асинхронных двигателей состоит в том, что во время работы двигателя в цепь обмотки ротора вводят сопротивление регулировочного реостата. Совершенно ясно, что такой способ регулировки скорости вращения применим только для асинхронных двигателей с фазным ротором.

Рассмотрим физические процессы в двигателе при введении сопротивления в цепь его ротора.

Вращающееся магнитное поле статора индуктирует в обмотке ротора э. д. с. E_{2s}. Так, например, при пуске э. д. с. ротора бывает настолько велика, что прикосновение к цепи ротора (реостату) становится опасным.

Рассмотрим случай, когда при определенном скольжении в обмотке ротора наводится э. д. с. E_{2s}, которая создает в цепи ротора ток I_2. Этот ток I_2, взаимодействуя с магнитным полем

статора Φ_1, создает момент вращения, равный моменту сопротивления. Введем теперь в цепь ротора сопротивленне реостата. В первый момент ротор будет вращаться с прежней скоростью, э. д. с. ротора E_{2s} при увеличенном сопротивлении в цепи будет создавать уменьшенный ток I_2. При меньшем токе I_2 момент вращения двигателя станет меньше момента сопротивления на валу двигателя и ротор станет уменьшать скорость вращения до тех пор, пока новая увеличенная э. д. с. E_{2s} ротора не создаст прежний ток, способный совместно с полем статора восстановить первоначальный момент вращения. Следовательно, каждое увеличение сопротивления в цепи ротора сопровождается увеличением скольжения или уменьшением скорости вращения двигателя.



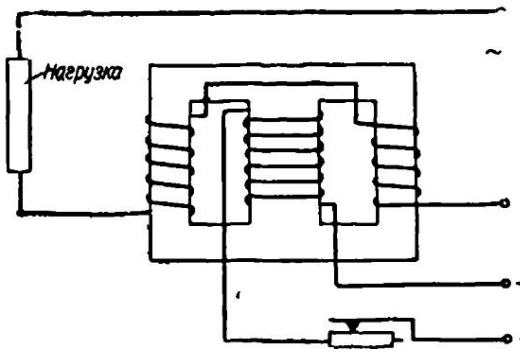
Фиг. 410. Схема включения асинхронного двигателя с пуско-регулировочным реостатом

Регулировочный реостат включают в цепь ротора так же, как и пусковой реостат. Разница в устройстве между пусковым и регулировочным реостатом состоит в том, что регулировочный реостат рассчитан на длительное прохождение тока. Для двигателей, у которых пронзводится регулировка скорости вращения путем изменения сопротивления в цепи ротора, пусковой и регулировочный реостаты объединяются в один пуско-регулировочный реостат.

Недостатком этого способа регулирования является то, что в регулировочном реостате происходит заметная потеря мощности, тем большая, чем шире регулировка скорости вращения двигателя. На фиг. 410 изображена схема включения асинхронного двигателя с пуско-регулировочным реостатом.

4. Управление с помощью дросселей насыщения. В последние годы для регулирования скорости асинхронных двигателей применяют дроссели насыщения. На фиг. 411 дана схема однофазного дросселя насыщения. Он имеет две обмотки: одна включена

в цепь переменного тока, другая, называемая управляющей или подмагничивающей обмоткой, подключается к источнику постоянного напряжения (выпрямителю). С увеличением тока в управляющей обмотке магнитная система дросселя насыщается и индуктивное сопротивление обмотки переменного тока уменьшается. Включая дроссели в каждую фазу асинхронного двигателя и меняя ток управляющей обмотки, можно, менять сопротивление в цепи статора двигателя, а следовательно и скорость вращения самого двигателя.



Фиг. 411. Схема дросселя насыщения

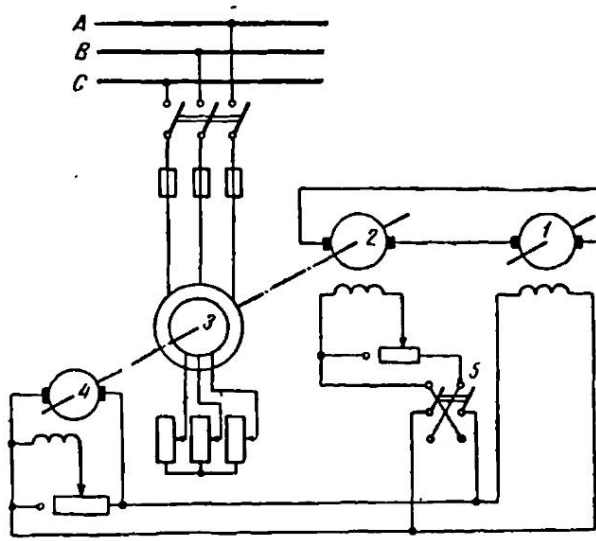
Кроме указанных выше, существуют другие способы регулировки скорости вращения асинхроиных двигателей. Например, регулировка скорости вращения путем механического соединения двух асинхронных двигателей, один из которых работает в двигательном режиме, другой — в режиме противовключения; регулировка по схеме с поворотным статором; регулировка скорости вращения при помощи асинхронной муфты скольжения; соединение двигателей в каскадные схемы и др.

§ 203. Специальные схемы пуска в ход и регулироваиия скорости вращения двигателей постоянного тока большой мощности

Для пуска в ход двигателей постоянного тока большой мощиости, а также для широкой регулировки скорости вращения двигателей применяют схему генератор-двигатель, сокращенно Г-Д (шахтные подъемники, прокатные станы, рулевое управлеиие судов, бумагоделательные и ситцепечатные машины). Пуск и регулировка двигателя по схеме Г-Д (фиг. 412) заключаются в следующем. Рабочий двигатель *1* получает питание от генератора постояиного тока *2*, приводимого во вращение синхронным или асинхронным двигателем *3*. Возбуждение рабочего двигателя и самого генератора осуществляется от специального возбудителя *4*, сидящего на одном валу с генератором. Для пуска рабочего двигателя необходимо включить первичный двигатель генератора. При достижении генератором нормальной скорости вращения выводят сопротивление реостата *5* в цепи возбуждения генератора. Напряжение генератора постепенно увеличивается до номинальной величины. Рабочий двигатель, на

щетках якоря которого увеличивается напряжение, приходит во вращение. Изменяя сопротивление регулировочного реостата в цепи возбуждения генератора, можно менять скорость вращения рабочего двигателя.

Система Г-Д дает возможность осуществить плавный пуск и широкую регулировку скорости вращения двигателя (100 : 1). В том случае, когда по условиям работы рабочий двигатель должен изменять направление вращения, в цепи возбуждения генератора устанавливают переключатель, который меняет на-



Фиг. 412. Схема Г-Д

правление тока в обмотке возбуждения, вследствие чего полярность щеток меняется и рабочий двигатель начинает вращаться в другую сторону.

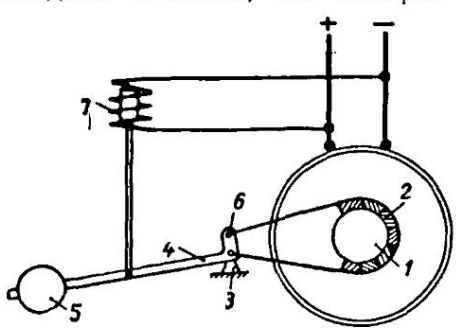
При резких колебаниях нагрузки на валу двигателя (шахтные подъемники, прокатные станы) пуск двигателя осуществляется по схеме Г-Д с маховиком. Эта схема отличается от схемы Г-Д наличием тяжелого маховика на валу, соединяющем первичный двигатель с генератором. Для работы с маховиком первичный двигатель выбирается с падающей механической характеристикой, т. е. с увеличением нагрузки на валу скорость вращения двигателя должна уменьшаться. Увеличение нагрузки на валу рабочего двигателя вызовет увеличение тока, забираемого двигателем у генератора. Мощность, необходимая для вращения нагруженного генератора, увеличивается. При отсутствии маховика первичный двигатель всю дополнительную мощ-

ность будет брать из сети, вызывая резкие колебания тока. Колебания тока в сети будут уменьшены, если на валу первичного двигателя имеется маховик. При своем вращении тяжелый маховик имеет запас кинетической энергии. С увеличеннем нагрузки генератора скорость вращения первичного двигателя уменьшается и освободившаяся кинетическая энергня маховика дает возможность покрывать резкие колебания механической нагрузки на валу рабочего двигателя *1*.

При уменьшенин нагрузки рабочего двигателя первичный двигатель увеличйвает скорость и маховик запасает кинетическую энергию.

§ 204. Торможение электрических двигателей

Если снять нагрузку с электрического двигателя и отключнть его от сети, то двигатель иекоторое время будет вращаться по инерции. Время его остановки будет особенно велико, если двигатель обладает большой массой и скоростью. Однако в процессе работы двигателя возможны частые пуски и быстрые остановки (станки, подъемные краны, подъемники и т. п.). Необходимо отметить, что быстрая остановка двнгателя имеет большее значение, чем его быстрый пуск. Если задержка при пуске двигателя приводнт к простою оборудования, то задержка при торможении может привести к поломке механизма, авариям, к увечью и гибели людей.



Фиг. 413. Механическое торможение двигателя с электромагнитным оттормаживанием

Торможение двигателей может быть осуществлено механическим и электрическим способами.

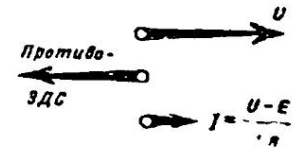
Механическое торможение производится при помощи ленточного или колодочного тормоза. На фиг. 413 показана принципиальная схема устройства ленточного тормоза с электромагнитным оттормаживанием. Шкив двигателя *1* охватывает стальная лента *2* с укрепленными на ней деревянными колодками. На опоре *3* шарнирно поворачивается тормозной рычаг *4* с грузом *5* на конце. Концы ленты крепятся к отросткам рычага *6*. При выключенной катушке *7* тормозной рычаг под действием груза занимает крайнее нижнее положение, отростки рычага натягивают стальную ленту, зажимающую при помощи колодок шкив двигателя.

Для пуска двигателя в ход включают в сеть катушку *7*, ко-

торая втягивает стальной сердечник, шарнирно связанный с тормозным рычагом. Рычаг поднимается, лента ослабляется и шкив двигателя оттормаживается.

Механическое торможение часто применяется в крановых установках. При этом способе торможения кинетическая энергия двигателя превращается в тепловую энергию, теряемую в тормозных колодках или ленте.

Электрическое торможение может быть произведено путем: 1) замыкания отключенного от сети якоря двигателя на сопротивление (динамическое торможение), 2) возврата энергии в сеть (рекуперация), 3) переключения двигателя на обратное вращение (торможение противотоком). При электрическом торможении кинетическая энергия двигателя превращается в электрическую энергию.



Фиг. 414. Напряжение сети, противо-э. д. с. и ток электродвигателя при его работе

Торможение двигателя путем замыкания якоря на сопротивление заключается в следующем. Для торможения двигателя обмотку якоря отключают от сети и замыкают на тормозное сопротивление, в то время как обмотка возбуждения двигателя остается подключенной к сети. Ток в обмотке якоря при работе двигателя равен:

$$I_я = \frac{U-E}{r_я},$$

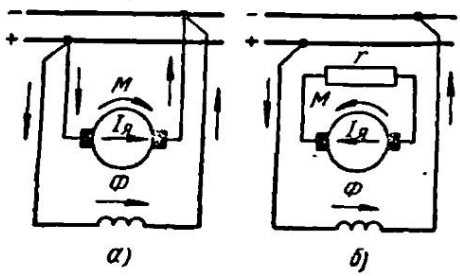
причем направление тока якоря совпадает с направлением напряжения сети (фиг. 414).

При отключении якоря от сети и замыкании его обмотки на сопротивление ток якоря будет:

$$-I = \frac{-E}{r_я + r}.$$

Противоэлектродвижущая сила E, индуктируемая в обмотке якоря при вращении двигателя, имеет направление, противоположное напряжению сети. Поэтому ток, вызванный ею, будет протекать обратно тому направлению, которое было во время работы двигателя. Изменение направления тока в обмотке якоря, в то время как в обмотке возбуждения направление тока не изменилось, приведет к тому, что двигатель, вращаясь в прежнем направлении, будет развивать момент, направленный в противоположную сторону, т. е. будет тормозиться. По мере того как двигатель будет останавливаться, противо-э. д. с. будет уменьшаться и тормозной момент также будет уменьшаться. Торможение двигателя произойдет тем быстрее, чем меньше будет тормозное сопротивление. Если в момент торможения одновременно с якорем отключить от сети также концы обмотки

возбуждения, то магнитный поток двигателя будет уменьшаться вместе с противо-э. д. с. и быстрого торможения не произойдет. При торможении двигателя с параллельным возбуждением, как видно из фиг. 415, пересоединения обмотки возбуждения делать не нужно. Рассмотрим торможение двигателя с последовательным возбуждением путем замыкания якоря на сопротивление. Если отключить концы двигателя и замкнуть их на тормозное сопротивление, то направление тока изменится одновременно как в обмотке якоря, так и в обмотке возбуждения, следовательно, торможения двигателя не произойдет. Во избежание этого в момент торможения обмотка возбуждения двигателя переключается таким образом, чтобы направление тока в ней осталось прежним. Для двигателей со смешанным возбуждением электрическое торможение путем замыкания якоря на сопротивленне выполняется как и у двигателей с параллельным возбуждением.



Фиг. 415. Торможение электродвигателя путем замыкания якоря на сопротивление:
а — схема двигателя до торможения; *б* — схема двигателя в момент торможения

Электрическое торможение с возвратом энергии в сеть возможно, когда противо-э. д. с. двигателя становится больше напряжения сети. Это может произойти, если: 1) напряжение сети станет меньше; 2) двигатель будет перевозбужден; 3) если скорость вращения двигателя будет выше скорости при холостом ходе. Во всех этих случаях направление тока в обмотке якоря меняется на обратное, и двигатель, вращаясь в прежнем направлении за счет кинетической энергии, превращается в генератор, отдавая в сеть электрическую энергию. Якорь двигателя при этом развивает тормозящий момент, в результате чего скорость якоря уменьшается до тех пор, пока противо-э. д. с. двигателя не станет равной напряжению сети. Увеличение скорости, которое определяется в данный момент напряжением и магнитным потоком, может произойти, например, у двигателя подъемного крана под действием веса опускающегося груза или у двигателя электровоза (трамвая), идущего под уклон.

У двигателя с параллельным возбуждением торможение путем возврата энергии в сеть происходит автоматически, без каких-либо переключений. У двигателя с последовательным возбужденнем торможение по этому способу без переключений произойти не может, так как направление тока одновременно меняется как в обмотке якоря, так и в обмотке возбуждения.

Двигатели со смешанным возбуждением можно тормозить

путем увеличения скорости вращения сверх скорости при холостом ходе только при наличии преобладающего влияния параллельной обмотки возбуждения.

Торможение путем переключения двигателя на обратное вращение (торможение противотоком) заключается в том, что обмотка якоря работающего двигателя переключается и направление тока в ней меняется на обратное. В этом случае ток в обмотке якоря равен:

$$I_я = \frac{-U+E}{r_я},$$

т. е. будет пропорционален не разности между U и E, а сумме их. Поэтому в первый момент величина тока в обмотке якоря будет особенно велика (в 20—40 раз больше номинального тока), двигатель получает большой механический толчок, а тепло, выделяемое обмоткой в это время, опасно для целости самой обмотки и ее изоляции. После переключения обмотки якоря на обратный ход двигатель, продолжая вращаться в прежнем направлении, развивает большой тормозящий момент.

При таком способе торможения необходимо вовремя отключить двигатель от сети, так как в противном случае он после останова начнет вращаться в обратную сторону. Торможение противотоком в том виде, как было описано выше, применяется в исключительных случаях, ввиду тяжелых последствий такого торможения для самого двигателя. Однако если в момент переключения обмотки якоря в цепь обмотки ввести сопротивление пускового реостата, то большого толчка тока не произойдет.

Асинхронные двигатели могут работать в следующих тормозных режимах: генераторном, противовключения и динамического торможения.

Генераторное торможение у асинхронных двигателей возможно при скорости выше синхронной. При этом машина, работая в генераторном режиме, тормозится, отдавая энергию в сеть.

Торможение противовключением производится путем переключения на ходу любых двух фаз двигателя. При этом двигатель, продолжая вращаться по инерции, развивает момент вращения, действующий в обратную сторону. Когда двигатель остановится, его необходимо отключить от сети, иначе он начнет вращаться в обратную сторону.

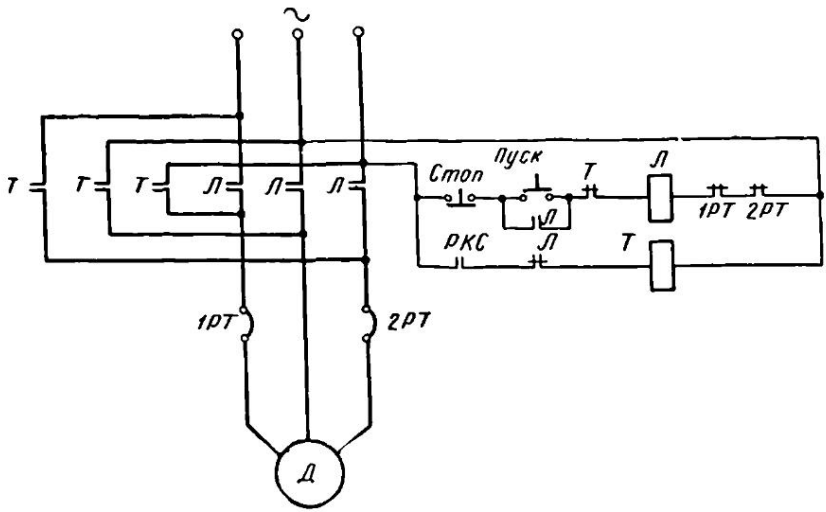
Динамическое торможение асинхронного двигателя осуществляется путем включения обмотки статора на постоянное напряжение.

§ 205. Схемы управления электродвигателями при помощи электромагнитных аппаратов

1. Управление асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором (фиг. 416). В этой схеме используются два контактора

Л и *Т*, два тепловых реле *1РТ* и *2РТ* и реле контроля скорости *РКС*. Цепь питания обмотки статора двигателя называется здесь силовой цепью. Замыкание и размыкание силовой цепи производится линейными контактами *Т* и *Л* соответствующих контакторов. Управление катушками контакторов производится со стороны цепи управления схемы. Реле *РКС* связано с валом двигателя, и при определенной скорости двигателя нормально отключенные контакты этого реле замыкаются.

При нажатии кнопки «пуск» возбуждается катушка контактора *Л*, который замыкает контакты *Л* в силовой цепи двигателя. Блок-контакт *Л* шунтирует кнопку «пуск» и нажатие ее мож-



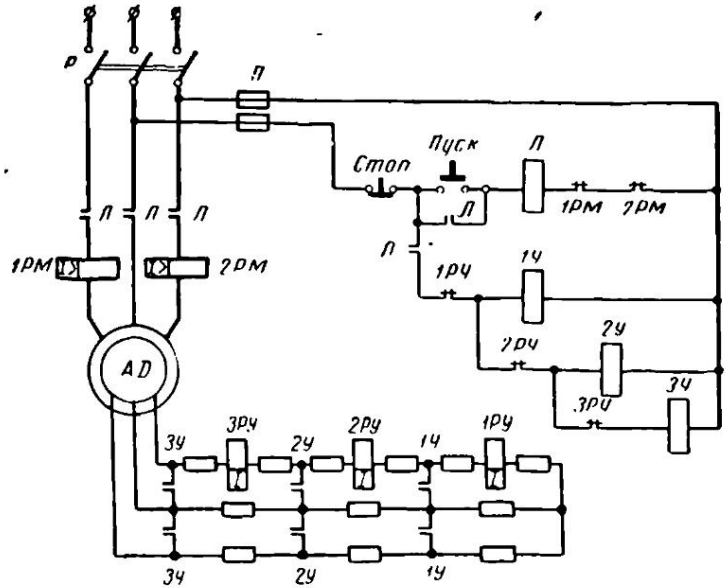
Фиг. 416. Схема управления асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором

но прекратить. Одновременно другой контакт *Л* (нормально замкнутый) разрывает цепь катушки контактора *Т*, который не может включиться, несмотря на то, что замыкается контакт реле *РКС*.

При нажатии кнопки «стоп» цепь контактора *Л* разрывается, контакты *Л* в силовой цепи размыкаются и двигатель отключается от сети. Нормально закрытый контакт *Л* замыкается, что приводит к возбуждению катушки контактора *Т*, который замыкает свои контакты в силовой цепи. Как видно из схемы, при этом две фазы меняются местами и двигатель, вращаясь в прежнюю сторону, развивает момент в сторону, обратную вращению. Происходит торможение противовключением. Как только скорость двигателя станет равной 10—15% от номинальной, контакты реле *РКС* размыкаются и двигатель отключается от сети.

Отключение двигателя может произойти автоматически. При перегрузке двигателя тепловые реле размыкают свои контакты в цепи контактора *Л* и двигатель отключается от сети.

2. Схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором (фиг. 417). В схеме использованы четыре контактора: линейный контактор *Л* и три контактора ускорения *1У, 2У* и *3У*. В цепи ротора включены пусковые сопротивления. В этой же цепи имеются катушки токовых реле ускорения *1РУ, 2РУ* и *3РУ*. Эти реле отрегулированы таким образом, что ток включения реле *1РУ* больше тока отключения *2РУ* и *3РУ*, а ток отключения *2РУ* больше тока *3РУ*.

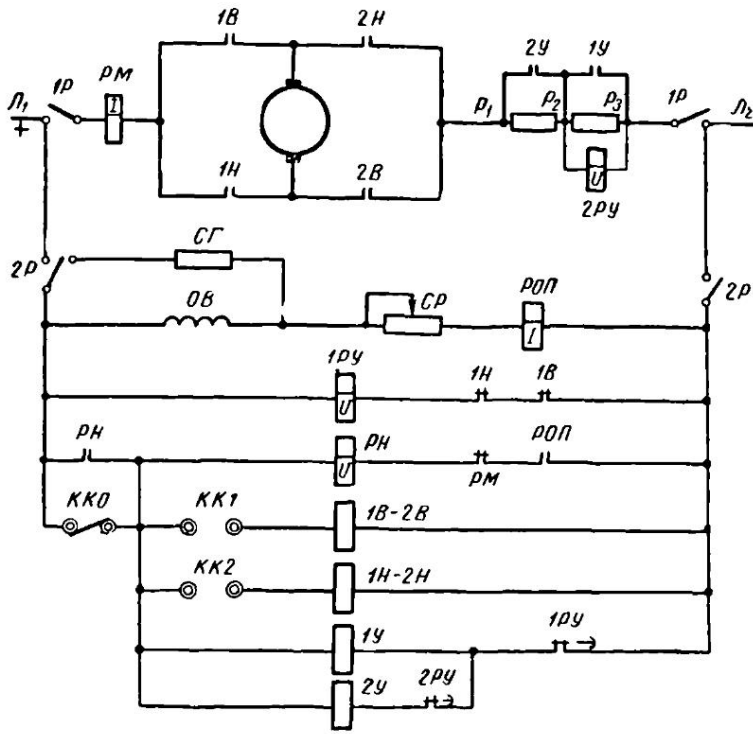


Фиг. 417. Схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором

При нажатии кнопки «пуск» включается линейный контактор, который своими контактами замыкает силовую цепь питания обмотки статора двигателя. Одновременно блок-контакт *Л* шунтирует кнопку «пуск», которую можно теперь отпустить. Вследствие больших токов в пусковых сопротивлениях при пуске двигателя возбуждаются катушки трех реле ускорений, которые разомкнут свои контакты в цепях контакторов ускорений *1У, 2У* и *3У*.

Как только ток в цепи ротора уменьшится до величины тока отключения реле *1РУ*, последнее отключается и замыкает своим контактом цепь контактора *1У*, который замкнет свои контакты

1У в цепи ротора и первая ступень сопротивлений будет закорочена. По мере уменьшения тока в цепи ротора прекращают свою работу сначала реле *2РУ*, затем *3РУ*. В цепи управления возбуждаются контактор *2У*, закорачивающий вторую ступень сопротивления в цепи ротора, затем *3У*, который закорачивает последнюю ступень пускового сопротивления. Два максимальных



Фиг. 418. Схема управления двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением

реле *1РМ* и *2РМ* отключают двигатель от сети при коротком замыкании в двигателе и его перегрузке.

3. Схема управления двигателем постоянного тока с параллельным возбуждением (фиг. 418). Схема предусматривает возможность пуска, остановки и реверсирования двигателя.

Управление двигателем производится при помощи командоконтроллера, имеющего три положения: нулевое — *ККО*, вперед — *КК1* и назад — *КК2*. Контакты *ККО* нормально замкнуты. В силовую цепь включены: обмотка максимального токового реле *РМ*, обмотка якоря двигателя и пусковое сопротивление. Питание к силовой цепи подается с помощью рубильника *1Р*.

Вспомогательная цепь питается через рубильник *2Р*. В этой цепи включены параллельная обмотка возбуждения двигателя *ОВ*, регулировочное сопротивление *СР* и катушка реле обрыва поля *РОП*. В целях предохранения обмотки возбуждения от перенапряжений при выключении эта обмотка подключается к разрядному сопротивлению *СГ*. Для пуска двигателя включают рубильники *1Р* и *2Р*, вследствие чего получает питание обмотка возбуждения *ОВ* двигателя и возбуждается реле *РОП*. Реле *РОП* замыкает свой контакт в цепи реле *РН*. Последнее возбуждается и замыкает свой *НО* (нормально открытый) контакт. Плюс сети на обмотку реле *РН* попадает через контакт *НО* реле *РН* и через *НЗ* (нормально закрытый) контакт командоконтроллера *ККО*.

После этого реле *1РУ* размыкает свой *НЗ* контакт в цепи контакторов *1У* и *2У*. При переводе рукоятки командоконтроллера в положение «вперед» — *ККI* возбуждается контактор *1В — 2В*, который замыкает свои два контакта в силовой цепи. Двигатель начинает работать. В пусковом сопротивлении двигателя происходит падение напряжения. Поэтому возбуждается катушка реле *2РУ*, включенная параллельно первой ступени сопротивления, и размыкает свой контакт в цепи контактора *2У*. При включении контактора *1В—2В* его контакт в цепи *1РУ* размыкается и реле *1РУ* отключается. Это приводит к тому, что контакт *1РУ* замыкается с выдержкой времени, контактор *1У* включается и своим контактом шунтирует первую ступень пускового сопротивления.

Далее схема работает следующим образом. Реле *2РУ* теряет возбуждение и с выдержкой времени замыкает свой контакт в цепи контактора *2У*. Закорачивается вторая ступень пускового сопротивления, и на щетки якоря подается полное напряжение сети. Для реверса двигателя рукоятку командоконтроллера переводят в положение «назад» — *КК2*. При этом включается контактор *1Н—2Н* и замыкает свои контакты в силовой цепи. Направление тока в обмотке якоря двигателя меняется на обратное. В остальном схема работает аналогично тому, как это было описано выше.

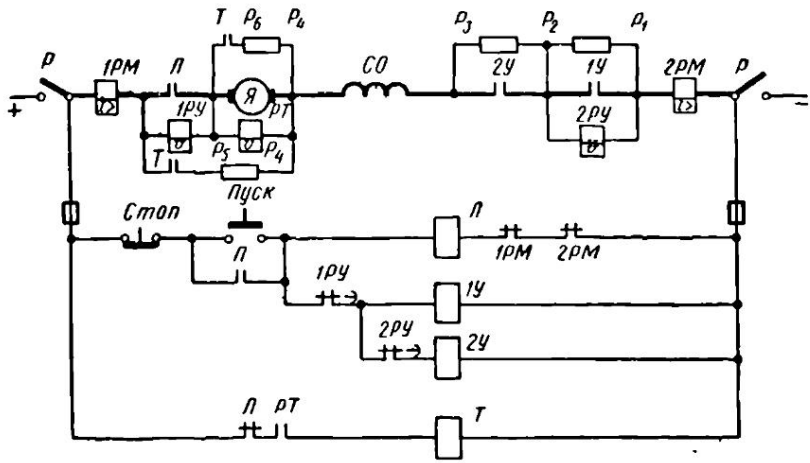
Если ток двигателя превзойдет установку тока максимального реле *РМ*, последнее разомкнет свои контакты в цепи *РН* и двигатель отключится от сети. Обрыв цепи возбуждения двигателя с параллельным возбуждением может повести за собой резкое увеличение скорости вращения, опасное для целости двигателя. Поэтому при исчезновении тока в обмотке возбуждения реле *РОП* разомкнет свой контакт в цепи *РН* и двигатель отключится от сети.

Регулирование скорости вращения производится при помощи регулировочного сопротивления *СР*.

4. Схема нереверсивного управления двигателем постоянного тока с последовательным возбуждением. В схеме (фиг. 419) ис-

пользованы четыре контактора: *Л* — линейный, *1У* и *2У* — контакторы ускорения и *Т* — контактор торможения. В схеме также применены пять реле: два максимальных реле *1РМ* и *2РМ*, два реле ускорения *1РУ* и *2РУ* и реле торможения *РТ*.

Замыкание рубильника вызовет включенне реле *1РУ*. Ток будет проходить от плюса сети через катушку реле *1РМ*, реле *1РУ*, обмотку якоря, последовательную обмотку возбуждения *СО*, пу-



Фиг. 419. Схема нереверсивного управления двигателем постоянного тока с последовательным возбуждением

сковое сопротивление $Р_3$—$Р_1$, обмотку реле *2РМ* на минус сети. Сопротивление катушки реле *1РУ* велико. Поэтому ток, проходящий в это время по цепи, не может привести двигатель во вращение. Включившись, реле *1РУ* разомкнет свой контакт в цепи контакторов *1У* и *2У*.

При нажатии кнопки «пуск» включается линейный контактор *Л* и своим контактом в силовой цепи замыкает цепь двигателя. Одновременно в цепи управления включается блок-контакт, шунтирующий кнопку «пуск», и размыкается нормально замкнутый контакт контактора *Л* в цепи контактора *Т*. Двигатель начинает работать, имея в цепи якоря полное пусковое сопротивление.

Падение напряжения в пусковом сопротивлении $Р_3$—$Р_1$ создает напряжение между точками $Р_2$ и $Р_1$, и, возбудившись, реле *2РУ* разомкнет свой контакт в цепи контактора *2У*. Включение линейного контактора *Л* вызовет закорачивание катушки реле *1РУ*, которое с выдержкой времени замкнет свой контакт в цепи контактора *1У*. Замыкание контактора *1У* в силовой цепи приведет к тому, что первая ступень пускового сопротивления будет исключена из схемы. Кроме того, катушка *2РУ*, потеряв возбуждение, с выдержкой времени замкнет свой контакт *НЗ* в цепи

контактора *2У*. Последний закоротит вторую ступень пускового сопротивления.

Во время работы двигателя реле *РТ* возбуждено и его контакт в цепи контактора *Т* замкнут. Однако контактор не может включиться, так как контактор *Л* в его цепи при работе двигателя разомкнут. Отключение двигателя производится нажатием кнопки «стоп». В этом случае контакторы *Л*, *1У* и *2У* отключаются и двигатель отсоединяется от сети. За счет противо-э. д. с. реле *РТ* будет при этом возбуждено.

Далее включается контактор *Т* и замыкает свои два контакта в силовой цепи. Один контакт контактора *Т* замыкает обмотку якоря двигателя на сопротивление P_6—P_4, а через другой контакт и сопротивление P_5—P_4 замыкается цепь обмотки возбуждения двигателя.

Происходит торможение двигателя замыканием его якоря на сопротивление. Уменьшение скорости вращения двигателя приводит к уменьшению противо-э. д. с. и примерно при 20% номинальной скорости реле *РТ* размыкает цепь контактора *Т*, а последний отключает схему.

§ 206. Управление электродвигателями при помощи контроллеров

С устройством контроллеров мы ознакомились в § 196. Для схематических изображений контроллеры мысленно разрезают и развертывают в плоскость. В этом случае сегменты принимают вид вытянутых прямоугольников, пальцы контроллера изображаются кружками. Пальцы контроллера и сопротивления, обозначенные одними цифрами, на схемах обычно не соединяются. Число положений контроллера показывается пунктирными вертикальными линиями.

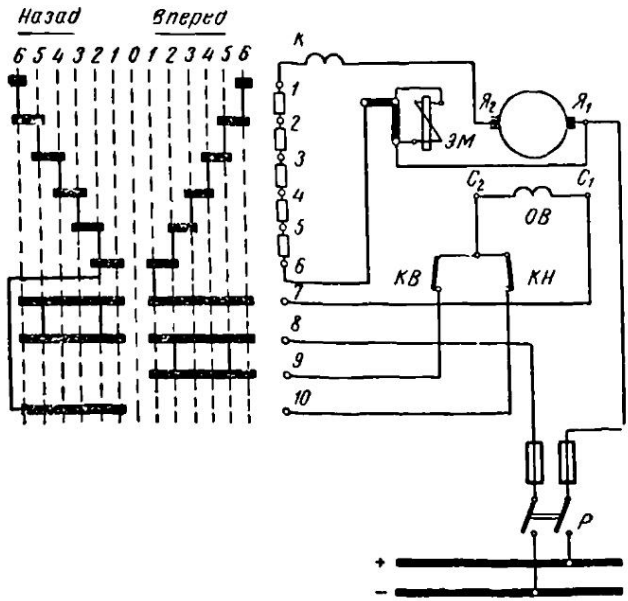
На фиг. 420 дана схема управления двигателем постоянного тока с последовательным возбуждением при помощи барабанного контроллера. Такая схема может быть применена для управления двигателем постоянного тока привода тележки или моста в мостовых кранах. Данная схема контроллера имеет концевые выключатели *КВ* и *КН*, тормозной электромагнит *ЭМ*, искрогасительную катушку *К*. У контроллера имеются 6 положений правого и левого вращения двигателя. Пальцевые контакты (пальцы) *1*—*10* контроллера, показанные на схеме справа от сегментов, на самом деле расположены по вертикальной линии, соответствующей нулевому положению.

Включим рубильник *Р*, поставим контроллер в первое положение «вперед». При этом сегменты замкнут пальцы *6* и *7*, *8* и *9*. Образуется следующая цепь тока: шина «плюс», обмотка якоря двигателя ($Я_1$—$Я_2$), искрогасительная катушка *К*, все пусковое сопротивление *1*—*6*, обмотка возбуждения двигателя *ОВ* ($С_1$ и $С_2$), конечный выключатель хода вперед *КВ*, шина «минус».

Во втором положении сегменты контроллера закоротят пальцы *5* и *6*. Это приведет к уменьшению пускового сопротивления.

В последующих положениях — третьем, четвертом и пятом — пусковое сопротивление будет выводиться ступенями и, наконец, в шестом положении оно будет выведено полностью.

Следует обратить внимание на направление тока в обмотке якоря и в обмотке возбуждения двигателя. При всех шести положениях хода «вперед» ток в обмотке якоря протекал от $Я_1$ к $Я_2$, а в обмотке возбуждения от $С_1$ к $С_2$.

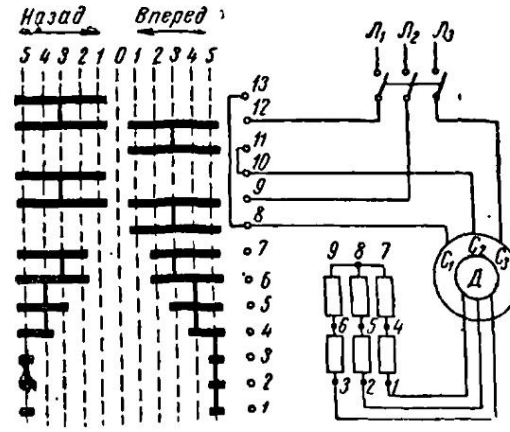


Фиг. 420. Схема управления двигателем постоянного тока при помощи барабанного контроллера

В первом положении хода «назад» образуется следующая цепь тока: шина «плюс», обмотка якоря, искрогасительная катушка *К*, палец *1*, все пусковое сопротивление *1—6*, палец 6, палец *10*, конечный выключатель назад *КН*, обмотка возбуждения двигателя (от $С_2$ к $С_1$), палец *7*, палец *8*, шина «минус». Как было легко заметить, направление тока в обмотке якоря осталось прежним, а в обмотке возбуждения изменилось на обратное. Поэтому направление вращения двигателя также изменится на обратное. Обмотка электромагнита *ЭМ* включена параллельно двигателю и осуществляет оттормаживание при пуске двигателя в ход. При отключении двигателя происходит его механическое торможение.

На фиг. 421 дана схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором при помощи барабанного контроллера. В первом положении хода «вперед» сегменты контроллера замыкают пальцы *11* и *12*, *8* и *9*. При этом образуются следующие цепи тока: 1) линия $Л_1$, палец *12*, палец *11*, палец *10*, зажим статора C_2; 2) линия $Л_2$, палец *9*, палец *8*, зажим статора C_1; 3) линия $Л_3$, зажим статора C_3. В цепи ротора имеется полное пусковое сопротивление.

Во втором положении хода «вперед» сегменты замыкают пальцы *6* и *7*, что приводит к частичному замыканию пускового сопротивления. В последующих положениях контроллера пусковое сопротивление полностью выводится и закорачивается.



Фиг. 421. Схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором при помощи барабанного контроллера

При переводе контроллера в положение «назад» схема работает аналогично положению «вперед», за исключением того, что фазы статора получают питание от других проводов сети (две фазы меняются местами).

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим приводом?
2. Что называется групповым, одиночным, многодвигательным приводом?
3. По каким признакам можно произвести классификацию электродвигателей?
4. Какие данные указываются на паспорте электродвигателей?
5. Какие существуют режимы работы электродвигателей?
6. Какая изоляция применяется в электрических машинах и какова наибольшая допустимая температура нагрева для каждого класса изоляции?
7. Какие существуют формы исполнения электрических машин?
8. Как происходит охлаждение электрических машин?
9. Как делятся двигатели по скоростной характеристике?
10. Какие существуют способы торможения электрических двигателей?
11. Как можно изменить направление вращения электрических двигателей?
12. Как регулируют скорость вращения электрических двигателей?
13. Какие существуют способы пуска электрических двигателей?
14. Какая существует аппаратура управления электрическими двигателями?

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

§ 207. Общие сведения

Аккумуляторные батареи комплектуются из свинцово-кислотных или щелочных аккумуляторов, из которых первые получили наибольшее распространение.

Батареи стационарных свинцово-кислотных аккумуляторов состоят из аккумуляторов типа С (стационарные для продолжительных раздрядных режимов) или СК (стационарные для коротких разрядных режимов). Аккумуляторы СК отличаются от аккумуляторов типа С усиленными соединительными полосами. Цифры после буквенного обозначения этих аккумуляторов характеризуют их емкость, разрядный и зарядный токи. Заводами изготовляются аккумуляторы с обозначениями от С-1 (СК-1) до С-148 (СК-148).

Аккумуляторы типа С предназначены для разряда в продолжении от 3 до 10 час.; максимально допускаемый 3-часовой разрядный ток 9 *а*. Аккумуляторы СК могут быть разряжены в более короткий срок — до 1 часа; максимально допускаемый одночасовой разрядный ток 18,5 *а*.

Кратковремеиный разрядиый ток (в течение не более 5 сек.) не должен превышать 250% тока трехчасового разряда для аккумуляторов типа С и 250% тока одночасового разряда для аккумуляторов типа СК.

Во время заряда допускается максимальный зарядный ток: 9 *а* для аккумуляторов типа С и 11 *а* для аккумуляторов типа СК.

Величина емкости, указанная для каждого типа аккумуляторов, меняется в широких пределах в зависимости от величины разрядного тока и режима разряда.

Основные характеристики аккумуляторов С-1 и СК-1 даны в табл. 19.

Пользуясь данной таблицей, можно определить емкость и разрядный ток любого аккумулятора. Для этого нужно умножить данные таблицы на номер аккумулятора. Например, для

Таблица 19

Техническая характеристика аккумуляторов С-1 и СК-1

Показатель	СК-1		С-1 и СК-1			
Продолжительность разряда:						
в часах	1	2	3	5	7,5	10
Емкость:						
в *а·ч*	18,5	22	27	30	33	36
в % от 10-часового режима	51,4	61,1	75	83,3	91,7	100
Разрядный ток:						
в *а*	18,5	11	9	6	4,5	3,6
в % от 10-часового режима	514	305	250	166	125	100
Максимальный зарядный ток в *а*	11	11	9	9	9	9
Конечное напряжение разряда в *в*	1,75	1,75	1,8	1,8	1,8	1,8

аккумулятора СК-6 при 2-часовом разряде емкость $Q = 22 \cdot 6 = 132$ *а·ч*, а разрядный ток $I_р = 11 \cdot 6 = 66$ *а*.

Заводами выпускаются свинцово-кислотные аккумуляторы на номинальную 10-часовую емкость, от 36 до 5328 *а·ч*. Данные аккумуляторов С и СК даны в табл. 20.

Для стационарных аккумуляторных батарей также применяются свинцово-кислотные аккумуляторы панцирного типа СП и СПК (стационарные панцирные). Для переносных аккумуляторных батарей используются свинцово-кислотные аккумуляторы типа СТ (стартерные).

Аккумуляторные батареи щелочных аккумуляторов комплектуются из железо-никелевых аккумуляторов типа ЖН и ТЖН. Данные железо-никелевых аккумуляторов приведены в табл. 21.

Номер аккумулятора соответствует его номинальной емкости в ампер-часах. Для аккумуляторов ЖН-22, ЖН-45, ЖН-60 и ЖН-100 емкость определена при 8-часовом режиме разряда до напряжения 1,1 *в*, а для аккумуляторов ТЖН-250, ЖН-300, ЖН-350 и ЖН-500 — при 5-часовом режиме разряда до напряжения 1 *в*.

Заряд аккумуляторов производится током нормального зарядного режима в течение 6—7 час. Допускается ускоренный заряд при следующем режиме: сначала в течение 2,5 часа током вдвое больше нормального, затем в течение 2 час. током нормальной величины.

Число часов разрядного режима определяется делением емкости аккумулятора в *а·ч* на величину разрядного тока в *а*.

Для переносных аккумуляторных батарей применяются железо-никелевые аккумуляторы 10-ЖН напряжением 12,5 *в*, 4ЖН — 5 *в*, 5ЖН — 6,5 *в*.

Таблица 20

Техническая характеристика кислотных аккумуляторов С и СК

№ аккумулятора	Тип пластины	Число пластин в аккумуляторе		Наружные размеры сосуда в *мм*			Количество электролита в *л*	Полный вес аккумулятора в *кг*	Элементы аккумуляторов типа СК			Элементы аккумуляторов типа С				Максимальный ток заряда в *а*
									одночасовой заряд			3-часовой разряд		10-часовой разряд		
		положительных	отрицательных	длина	ширина	высота			емкость в *а·ч*	ток заряда в *а*	максимальный ток разряда в *а*	емкость в *а·ч*	ток разряда в *а*	емкость в *а·ч*	ток разряда в *а*	
1	И-1	1	2	80	215	270	4,0	14,2	18,5	18,5	11	27	9	36	3,6	9
2	И-1	2	3	130	215	270	6,6	22,5	37	37	22	54	18	72	7,2	18
3	И-1	3	4	180	215	270	9,0	30,0	55,5	55,5	33	81	27	108	10,8	27
4	И-1	4	5	230	215	270	11,0	36,2	74	74	44	108	36	144	14,4	36
5	И-1	5	6	230	215	270	10,5	41,0	92,5	92,5	55	135	45	180	18	45
6	И-2	3	4	195	220	485	16,0	51,8	111	111	66	162	54	216	21,6	54
8	И-2	4	5	195	220	485	15,5	60,0	148	148	88	216	72	288	28,8	72
10	И-2	5	6	260	220	485	20,0	76,3	185	185	110	270	90	360	36	90
12	И-2	6	7	270	220	485	19,5	84,2	222	222	132	324	108	432	43,2	108
14	И-2	7	8	295	220	485	21,0	93,7	259	259	154	378	126	504	50,4	126
16	И-2	8	9	345	220	485	27,0	112,0	296	296	176	432	144	576	57,6	144
18	И-2	9	10	395	220	485	30,0	126,0	333	333	198	486	162	648	64,8	162
20	И-2	10	11	425	220	485	31,0	133,0	370	370	220	540	180	720	72,0	180

Таблица 21

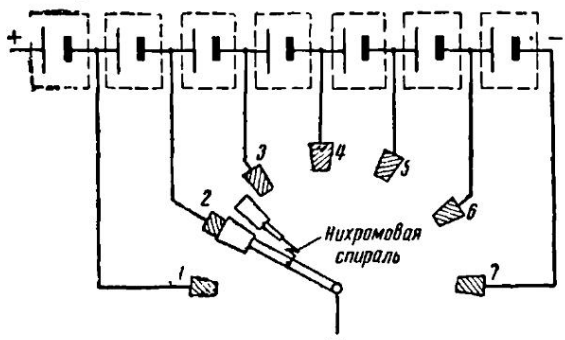
Техническая характеристика железо-никелевых аккумуляторов

Тип аккумулятора	Номинальная емкость в *а·ч*	Номинальный зарядный ток 7-часового режима в *а*	Номинальные разрядные токи (*а*) и соответствующие предельные напряжения при продолжительности разряда, равной					Размеры в *мм*			Вес аккумулятора в *кг*	
			8 час. до 1,1 *в*	5 час. до 1,0 *в*	3 час. до 0,8 *в*	2 час. до 0,65 *в*	1 час. до 0,5 *в*	ширина	длина с цапфами	высота с зажимами	без электролита	с электролитом
ЖН-22	22	5,5	2,75	4,4	7,33	11	22	32	125	213	1,41	1,73
ЖН-45	45	11,25	5,65	9	15	22,5	45	53	125	213	2,31	2,85
ЖН-60	60	15,0	7,5	12	20	30	60	45	152	349	3,88	4,78
ЖН-100	100	25,0	12,5	20	33,3	50	100	70	152	349	5,40	6,80
ТЖН-250	250	62,5	31,3	50	83,3	125	250	118,5	176	375	12,6	15
ТЖН-300	300	75,0	37,5	60	100	150	300	118,5	176	440	14,3	18,5
ТЖН-350	350	90,0	43,7	70	115	175	350	141,5	176	520	19,5	25
ТЖН-500	500	125,0	62,5	100	166,5	250	500	141,5	176	550	21,0	28,2

§ 208. Элементные коммутаторы (переключатели)

При работе аккумуляторной батареи напряжение каждого элемента уменьшается. Если не принять особых мер, то напряжение на шинах аккумуляторной батареи будет также уменьшаться. В связи с этим по мере разряда батареи дополнительно к работающим аккумуляторам нужно подключать новые (свежие) элементы. Таким образом, аккумуляторная батарея состоит из некоторого числа постоянно работающих элементов и нескольких элементов, включаемых и выключаемых по мере надобности.

Аппарат, посредством которого производится изменение числа действующих элементов батареи, называется элементным коммутатором.



Фиг. 422. Элементный переключатель

На фиг. 422 показана схема включения одноэлементного коммутатора. При включении ручка коммутатора не должна разрывать цепи постоянного тока. Для этого ее можно было бы сделать шире, чем расстояние между контактами. Но это привело бы к короткому замыканию аккумулятора при переводе ручки с одного контакта на другой. В связи с этим конец ручки изготовляется из двух металлических щеток, сдвинутых на расстояние, выбираемое с таким расчетом, чтобы в момент схода одной щетки с контакта другая находила бы на соседний контакт.

Обе щетки соединены между собой нихромовой или никелиновой спиралью. Сопротивление спирали выбирается таким, чтобы в момент замыкания аккумулятора в цепи не протекал слишком большой ток.

§ 209. Потребители аккумуляторных батарей

На электрических станциях и подстанциях имеются следующие виды нагрузок постоянного тока:

1) постоянная нагрузка — сигнальные и контрольные лампы

на щитах управления, некоторые реле защиты и автоматики и др.;

2) временная нагрузка — возникает в случае прекращения питания подстанции переменным трехфазным током; состоит из ламп аварийного освещения и двигателей постоянного тока;

3) кратковременная нагрузка — механизмы включения электрических приводов выключателей, часть реле защиты и автоматики.

Номинальное напряжение для приемников энергии сети постоянного тока составляет 12, 24, 48, 110 и 220 *в*. Для небольших подстанций при установке выключателей с ручным или пружинным приводом применяют напряжение 24 или 48 *в*. На электрических станциях и крупных подстанциях для собственных нужд применяют напряжения постоянного тока 110 или 220 *в*.

§ 210. Зарядные агрегаты

Для заряда и подзаряда аккумуляторных батарей, а также для одновременного питания приемников собственных нужд постоянного тока применяются двигатель-генераторы, ртутные и селеновые выпрямители.

Зарядный двигатель-генератор состоит из асинхронного двигателя трехфазного тока, питающегося от шин собственных нужд и сидящего на одной оси с генератором постоянного тока с параллельным возбуждением.

Генератор с помощью регулировочного реостата в цепи возбуждения должен менять напряжение в широких пределах: для заряда свинцово-кислотных аккумуляторов от 230 до 320 *в* (для батарей 220 *в*) или от 115 до 160 *в* (для батарей 110 *в*); для заряда железо-никелевых аккумуляторов — соответственно от 230 до 440 *в* или от 115 до 220 *в*.

Стеклянные ртутные выпрямители, применяемые в качестве зарядных агрегатов, имеют следующие преимущества перед двигатель-генераторами: отсутствие вращающихся частей, бесшумность работы, надежность действия, более высокий к. п. д. Вместе с этим ртутные выпрямители имеют и недостатки; они не могут выдерживать сильных толчков нагрузки, стеклянная колба имеет малый срок службы (200 час.); в связи с этим ртутные выпрямители для заряда аккумуляторных батарей применяются редко.

Селеновый выпрямитель по сравнению с другими преобразовательными агрегатами малой мощности обладает преимуществами, которые заключаются в следующем: весьма большой срок службы (до 25 000 час.), надежность работы, простота обслуживания, высокий к. п. д. (80—85%), малые габариты и вес, значительная перегрузочная способность, отсутствие хрупких и быстро изнашивающихся частей; кроме того он не боится тряски.

§ 211. Режим работы аккумуляторных батарей

Применяются два режима работы аккумуляторных батарей: заряд-разряд и постоянный подзаряд.

Режим заряд-разряд характеризуется тем, что после заряда аккумуляторной батареи зарядное устройство отключается и батарея питает постоянную нагрузку (лампы сигнализации, приборы управления), периодически кратковременную нагрузку (электромагнитные приводы выключателей) и аварийную нагрузку. Разряженная до определенного напряжения батарея вновь подключается к зарядному агрегату, который, заряжая батарею, одновременно питает нагрузку.

Для батареи, работающей по методу заряд-разряд, один раз в три месяца производится уравнительный заряд (перезарядка).

Режим постоянного подзаряда заключается в следующем. Батарея непрерывно подзаряжается от подзарядного агрегата, и поэтому она находится в любой момент в состоянии полного заряда. Толчковые нагрузки, возникающие в сети постоянного тока (например при действии электромагнитных приводов высоковольтных выключателей или быстродействующих автоматических выключателей), воспринимает аккумуляторная батарея.

Один раз в месяц батарея, работающая в режиме постоянного подзаряда, должна быть заряжена от зарядного агрегата.

Сравнивая между собой два режима работы аккумуляторной батареи, можно указать на следующие преимущества режима постоянного подзаряда. Износ пластин батареи, работающей в режиме постоянного подзаряда, значительно меньше, чем у батареи, работающей в режиме заряд-разряд. Батарея в режиме постоянного подзаряда всегда готова к работе, чего нельзя сказать о батарее, работающей в режиме заряд-разряд. Здесь может случиться, что от разряженной батареи, приготовленной к включению на заряд, вдруг потребуется мощность, которую батарея дать не может. Поэтому аккумуляторные батареи преимущественно работают в режиме постоянного подзаряда.

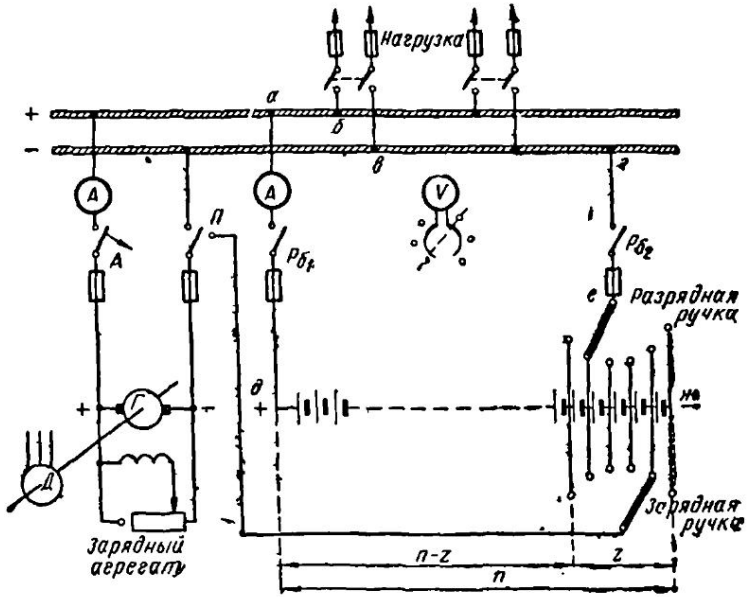
Для осуществления режима заряд-разряд применяют схему аккумуляторной батареи с двойным элементным коммутатором (переключателем) (фиг. 423). В качестве зарядного агрегата здесь применен двигатель-генератор. Генератор присоединен к шинам через предохранители, автомат максимального тока с реле обратного тока, амперметр и переключатель *П* на два положения.

Максимальный автомат защищает генератор от перегрузки.

Реле обратного тока отключает генератор, если его э. д. с. станет меньше напряжения на шинах батареи. Это может произойти при уменьшении скорости вращения генератора, исчезновении напряжения переменного тока, питающего двигатель, и от

других причин. Если в это время не отключить генератор, то он, перейдя в режим двигателя, станет нагрузкой для батареи.

Коммутатор имеет две ручки, из которых одна предназначена для заряда, а другая — для разряда. Обе ручки насаживаются на одну ось и могут поворачиваться независимо одна от другой.



Фиг. 423. Схема аккумуляторной установки с двойным элементным переключателем

Общее число аккумуляторов, соединяемых в батарею, должно быть таким, что даже разряженные до минимального напряжения $u_{раз}$ элементы должны обеспечить на шинах батареи номинальное напряжение $U_ш$ (115 или 230 *в*).

Выше было указано, что минимальным напряжением, ниже которого нельзя разряжать аккумулятор, будет для кислотно-свинцовых аккумуляторов 1,75—1,8 *в*, а для щелочных — 0,9—1 *в*.

Общее число аккумуляторов n в батарее находится из условия:

$$n = \frac{U_ш}{u_{раз}}.$$

Например, при $U_ш = 115$ *в* и $u_{раз} = 1{,}8$ *в* число аккумуляторов должно быть:

$$n = \frac{115}{1{,}8} = 64.$$

Обычно берут 66 аккумуляторов.

По схеме, представленной на фиг. 423, можно осуществить следующие случаи работы:

1) работает одна аккумуляторная батарея, питая нагрузку;

2) работает один зарядный агрегат, питая нагрузку;

3) зарядный агрегат работает параллельно с аккумуляторной батареей; агрегат и батарея совместно питают нагрузку;

4) зарядный агрегат заряжает батарею, одновременно питая нагрузку.

Рассмотрим каждый из перечисленных случаев работы аккумуляторной установки.

Разряд батареи. Зарядный агрегат не работает. Автомат A (фиг. 423) и переключатель $П$ отключены. Разрядная рукоятка ставится в крайнее левое положение. Включены рубильники $Р_{б_1}$ и $Р_{б_2}$. По мере разряда батареи для поддержания напряжения на шинах постоянным рукоятка передвигается вправо. Тем самым вводятся в работу свежие аккумуляторы.

Работа одного зарядного агрегата на сеть. Включен автомат A, переключатель $П$ стоит в левом положении. Рубильники батареи $Р_{б_1}$ и $Р_{б_2}$ отключены.

Параллельная работа генератора и батареи на сеть. Зарядный агрегат работает. Включен автомат A. Переключатель $П$ поставлен в левое положение. Рубильники $Р_{б_1}$ и $Р_{б_2}$ включены.

Работа зарядного агрегата на заряд батареи и на сеть. Если нагрузка сети незначительна, то агрегат может отдавать ток в сеть и одновременно заряжать аккумуляторную батарею. Однако к концу заряда генератор дает напряжение больше того, при котором обычно работает сеть. Если включить в цепь реостат, то за счет падения напряжения в нем можно уменьшить напряжение. Но это неэкономично. Простым решением задачи одновременной работы генератора на сеть и на заряд является применение в схеме двухэлементного коммутатора. Последний дает возможность использовать разность между напряжением генератора и напряжением сети для заряда группы аккумуляторов, присоединенных к коммутатору.

Число аккумуляторов, соединенных с коммутатором z, можно определить, исходя из следующих рассуждений. Число постоянно работающих аккумуляторов в батарее равно $n—z$. При работе генератора на заряд и на сеть эта группа аккумуляторов подключается параллельно на шины установки. Поэтому напряжение на шинах $U_ш$ к концу заряда должно быть равно напряжению, приходящемуся на группу постоянно работающих аккумуляторов.

Число аккумуляторов, соединенных с коммутатором, определится из выражения:

$$z = n - \frac{U_ш}{u_{зар}} .$$

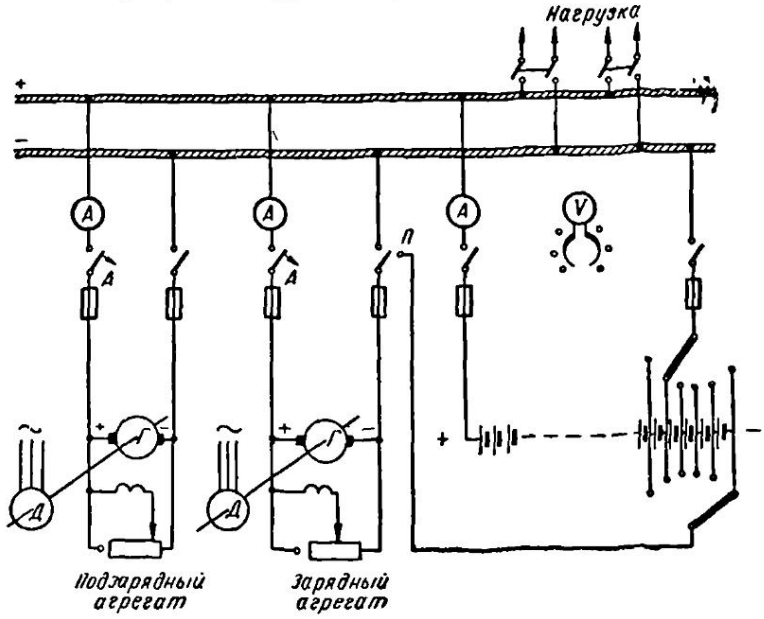
Например, при $U_ш = 115$ *в*, $n = 64$ и $u_{зар} = 2{,}7$ *в*

$$z = 64 - \frac{115}{2{,}7} = 21 \text{ элемент.}$$

В этом случае обычно берут 22 элемента, что составляет третью часть всех аккумуляторов батареи.

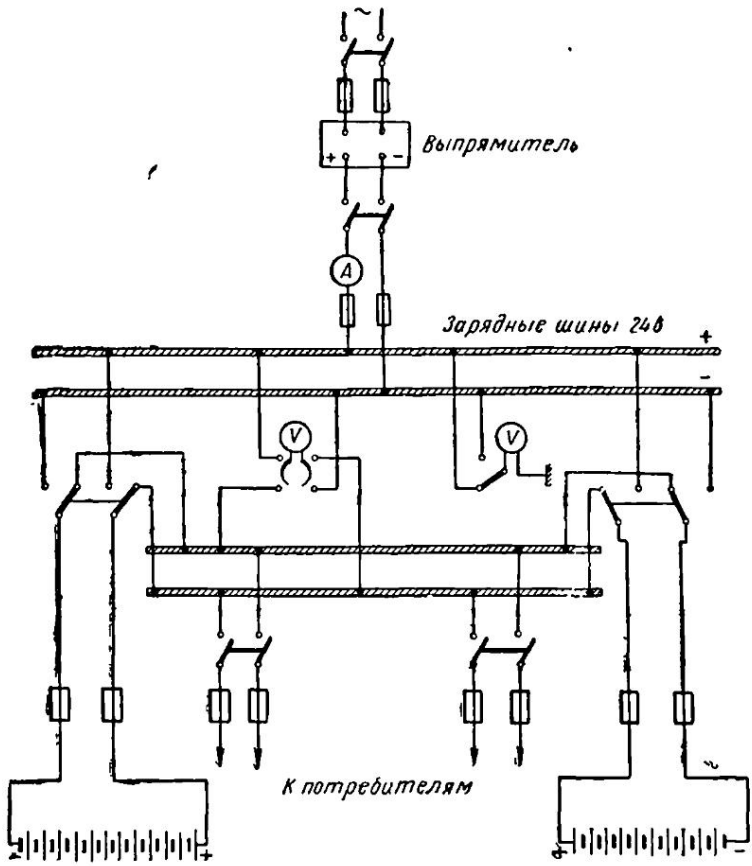
Для работы генератора на заряд и на сеть пускают в ход асинхроииый двигатель и, регулируя возбуждение генератора, устанавливают на шинах батареи иоминальиое иапряжение. Включают автомат *А*, ставят переключатель *П* в правое положение, замыкают рубильники $Р_{б1}$ и $Р_{б2}$. Зарядную рукоятку коммутатора ставят в крайнее правое положение, а разрядную располагают немного левее по отношению к зарядной.

Ток генератора *I* состоит из двух токов: тока нагрузки $I_н$ и тока заряда батареи $I_{зар}$. Ток генератора от точки *а* растекается иа две части: от точки *б* он направляется в сеть и через точки *в* и *г* поступает на разрядную рукоятку (точка *е*). Ток заряда $I_{зар}$ от точки *а* направляется через батарею к точке *е*. Между точками *е* и *ж* по аккумуляторам, включенным между двумя рукоятками коммутатора, протекает зарядный ток и ток нагрузки, т. е. полный ток генератора. Для того чтобы аккумуляторы, соединенные с коммутатором, не страдали от перегрузки, их выбирают иа больший зарядный ток. По мере заряда зарядная и разрядная ручки передвигаются влево.



Фиг. 424. Схема аккумуляторной батареи, работающей по режиму постоянного подзаряда

На фиг. 424 дана схема аккумуляторной батареи, работающей нормально по режиму постоянного подзаряда. Схема допускает также возможность работы батареи в режиме заряд-разряд. Здесь постоянно работает подзарядный агрегат небольшой



Фиг. 425. Схема установки с маломощной аккумуляторной батареей

мощности. Зарядный агрегат включается лишь при работе батареи по режиму заряд-разряд. Подзарядиый агрегат является резервом для зарядного агрегата.

Аккумуляторные батареи 24—48 *в* малой мощности составляются из двух групп, которые заряжаются и разряжаются попеременно. На фиг. 425 дана схема установки с маломощной аккумуляторной батареей.

§ 212. Помещение для аккумуляторных батарей

Аккумуляторные батареи располагаются в специальном помещении подвального или первого этажа здания электростанции или подстанции. Помещение должно быть сухим, не подвергающимся резким изменениям температуры, тряске или колебаниям. Вход в помещение делается с тамбуром. На дверях вывешиваются предупредительные надписи: «Аккумуляторная», «Огнеопасно», «С огнем не входить», «Курить воспрещено».

Температура помещения на уровне расположения аккумуляторов не должна быть ниже 10°.

Стены и потолок, двери и оконные рамы, вентиляционные коробы, металлические конструкции и другие части помещения должны периодически окрашиваться кислотоупорной краской (при установке свинцово-кислотных аккумуляторов).

Для осветительной проводки в аккумуляторных помещениях применяются кабели СРГ и ВРГ. Осветительная арматура должна быть взрывобезопасной. Выключатели, штепсельные розетки, предохранители устанавливаются вне аккумуляторного помещения.

Помещение аккумуляторной должно иметь приточно-вытяжную вентиляцию.

Нагрев воздуха, поступающего в помещение в зимнее время, лучше всего производить при помощи калорифера.

Полы аккумуляторного помещения делаются асфальтовыми или устилаются метлахскими плитками.

Аккумуляторные банки помещают на деревянных стеллажах, получаемых совместно с аккумуляторами от завода-поставщика. Аккумуляторы на стеллажи ставятся в один или два вертикальных ряда (этажа). Между стеллажами и полом для изоляции ставятся стеклянные пластинки.

Стеклянные банки аккумуляторов устанавливают на фарфоровых изоляторах, опирающихся на стеллажи.

Ошиновка аккумуляторного помещения делается медным голым проводом на изоляторах ТФ. Соединение аккумуляторной с элементным коммутатором, установленным на щите управления, производится с помощью проходной плиты, укрепленной на стене помещения. Аккумуляторная имеет специальное место, где хранятся бутыли с серной кислотой и дистиллированной водой.

Контрольные вопросы

1. Каковы основные данные аккумуляторов?
2. Для чего служат и как устроены элементные коммутаторы?
3. Перечислить потребителей аккумуляторных батарей.
4. Какие зарядные агрегаты применяются для заряда аккумуляторных батарей?
5. Какие существуют режимы работы аккумуляторных батарей и чем они характеризуются?
6. Как устроено помещение аккумуляторной батареи?

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

§ 213. Основные правила техники безопасности

Работа на электрических установках совершенно безопасна, если обслуживающий персонал будет точно соблюдать правила технической эксплуатации и правила безопасности. Для этого к работе на электрических установках допускаются лица, изучившие правила безопасности и получившие удостоверения о проверке знаний с присвоением квалификационной группы.

Ежегодно (или 1 раз в 6 месяцев) работники, обслуживающие электрические установки, проходят проверку знаний правил безопасности. Все работы на высоком напряжении производятся по нарядам установленной формы, не менее чем двумя лицами, с обязательным использованием необходимых защитных средств

Основными защитными средствами называются приспособления, изоляция которых надежно выдерживает рабочее напряжение установки и которыми допускается касаться токоведущих частей, находящихся под напряжением.

К основным изолирующим защитным средствам в установках любого напряжения относятся изолирующие штанги для оперативных переключений, для производства измерений, для наложения заземления и других целей и изолирующие клещи для предохранителей, а в установках низкого напряжения, кроме того, — диэлектрические перчатки и рукавицы и монтерский инструмент с изолирующими ручками.

Дополнительными защитными средствами называются такие приспособления, которые сами по себе не могут обеспечить безопасность от поражения током и служат для усиления действия основных защитных средств, а также служат для защиты от напряжения прикосновения, шагового напряжения и от ожогов электрической дугой. К дополнительным защитным изолирующим средствам в установках высокого напряжения относятся: диэлектрические перчатки и рукавицы, диэлектрические боты, резиновые коврики и дорожки, изолирующие подставки. При

всех операциях на высоком напряжении основные защитные средства следует применять совместно с дополнительными. Защитные средства как находящиеся в употреблении, так и содержащиеся в запасе должны быть занумерованы и в определенные сроки их состояние должно быть проверено.

К установкам низкого напряжения относятся все электрические установки, у которых напряжение между любым проводом и землей не превосходит 250 *в*. Все остальные установки относятся к установкам высокого напряжения.

В установках низкого напряжения все токоведущие части должны быть защищены от случайного прикосновения к ним. Так, например, ножи рубильников, контакты реостатов должны иметь защитные приспособления.

При работе в сырых помещениях, а также на хорошо заземленных предметах (котлы, мосты) необходимо применять понижающие трансформаторы (12 *в* и 24 *в*).

Все металлические предметы, расположенные вблизи токоведущих частей и могущие войти в соприкосновение с последними, должны быть заземлены.

Работы на вращающихся машинах и их аппаратуре производить не разрешается, за исключением шлифовки контактных колец и коллектора.

Ремонтные и монтажные работы должны производиться при отключенном оборудовании. Если же установку по тем или иным причинам отключить нельзя, то при работе под напряжением необходимо соблюдать правила техники безопасности, используя защитные приспособления (изолирующие подкладки, резиновые калоши, инструменты с изолирующими ручками, резиновые перчатки, приспособления для заземления и короткого замыкания, штанги и защитные очки).

В необходимых местах должны быть укреплены предостерегающие металлические плакаты или с изображением черепа и надписью «Не трогать — смертельно», или «Высокое напряжение — осторожно, опасно для жизни», или с другими подобными надписями. Плакаты должны быть достаточно велики, с ясным крупным шрифтом, исполнены несмываемой краской. Наименьший размер плакатов 20×10 *см*.

При работах под высоким напряжением должны быть соблюдены следующие меры предосторожности:

а) работы должны производиться только группой рабочих (не менее двух) с тем, чтобы один из них мог подать помощь другому при несчастном случае;

б) рабочие должны быть хорошо изолированы от земли;

в) во время производства работ рабочие не должны прикасаться к лицам, стоящим неизолированно, а также к металлическим частям, как-то: машинам, трубам и т. п.;

г) перед началом работ все защитные приспособления должны быть тщательно проверены самими рабочими.

Строго воспрещается приступать к работе в устройствах высокого напряжения (подстанции, трансформаторные помещения, части их, кабели и пр.) до получения устного или письменного указания производителя работ и извещения о том, что напряжение выключено и можно приступать к работе.

Перед началом работы в установках и оборудованиях высокого напряжения необходимо при помощи соответствующих приборов убедиться в отсутствии напряжения в той части установки, в которой будет производиться работа. Затем нужно произвести разрядку собирательных шин, кабелей трансформаторов, проверить их на короткое замыкание, замкнуть их и надежно заземлить.

Прежде чем начинать работу, необходимо проверить надежность и прочность лестниц, стремянок, лесов, подмостей, люлек, канатов, тросов.

Выше были перечислены некоторые правила по технике безопасности при производстве электромонтажных работ по устройству и оборудованию установок низкого и высокого напряжения.

§ 214. Поражение электрическим током

Каждый рабочий и электромонтер, работая в электрических установках, должен себе ясно представлять смертельную опасность электрического тока.

Поражение людей электрическим током возможно вследствие: 1) соприкосновения с частями установки, нормально находящимися под напряжением, и 2) соприкосновения с частями установки, нормально не находящимися под напряжением, но случайно могущими оказаться под таковым благодаря повреждению изоляции (например, кожухи машин и аппаратов).

Человек, пораженный электрическим током, теряет сознание и часто не подает признаков жизни (не дышит, сердце не бьется).

В легких случаях потеря сознания продолжается несколько секунд и пострадавший без посторонней помощи приходит в себя. В тяжелых случаях сознание не возвращается через несколько секунд, и в этом случае нужна срочная, энергичная и умелая помощь, иначе наступит смерть. Всякое промедление и долгие сборы ведут за собой гибель пострадавшего.

Смерть от действия электрического тока часто бывает лишь кажущаяся; только врач может решить вопрос о бесполезности дальнейших усилий по оживлению потерпевшего и установить смерть пострадавшего.

Поэтому при поражении электрическим током необходимо быстро освободить пострадавшего от соприкосновения с токоведущими частями и, невзирая на внешнюю картину смерти, подтверждаемую первичными признаками, немедленно (секунды промедления могут оказаться роковыми для пострадавшего)

приступить к прнемам искусственного дыхания и продолжать их непрерывно до оживлення или до появления неоспоримых так называемых вторнчных признаков смерти, к числу которых в первую очередь относятся трупные пятна, появляющиеся лишь спустя несколько часов после наступления смерти.

Главной причнной мнимой смерти является остановка дыхания. Поэтому жизнь человека, пострадавшего от электрического тока, будет зависеть от того, насколько быстро ему сумеют вернуть дыхание.

Основной мерой оживления мнимоумершего является искусственное дыхание, которое состоит в наиболее полном подражании естественному вдоху и выдоху.

§ 215. Правила подачи первой помощи пострадавшим от электрического тока

Главным условием успеха при оказании первой помощи является быстрота освобождения пострадавшего от тока и быстрота перехода к правильной подаче первой помощи.

Освобождение пострадавшего от тока.

Первым действием должно быть быстрое отключение той части установки, которой касается пострадавший.

Если пострадавший может при этом упасть с высоты, нужно предупредить или обезопасить его падение.

Если быстро отключить установку нельзя, необходимо отделить пострадавшего от токоведущих частей.

На низком напряжении. Для отделения пострадавшего от токоведущих частей или провода от пострадавшего следует воспользоваться сухой палкой, доской, веревкой, одеждой или другим сухим непроводником. Нельзя пользоваться в таких случаях металлическими или мокрыми предметами.

Чтобы оторвать пострадавшего от токоведущих частей, можно также взяться за его одежду, если она суха и отстает от тела, например за полы, не прикасаясь при этом к окружающим металлическим предметам и к частям тела, не покрытым одеждой. Оттаскивать пострадавшего за ноги можно только при условии хорошей изоляции рук.

Для изоляции себя от земли и от тела пострадавшего подающий помощь может надеть резиновые калоши или встать на сухую доску или на какую-либо сухую, не проводящую тока подстилку, на руки надеть резиновые перчатки или обернуть свои руки в прорезиненную или другую сухую материю.

Когда ток проходит через человека в землю, можно прервать ток, отделив пострадавшего от земли. При этом необходимо соблюдать указанные выше меры безопасности.

В случае необходимости следует перерубить или перерезать провода (каждый в отдельности) топором с сухой деревянной

рукояткой или соответствующим изолированным инструментом, приняв меры к изоляции себя от земли.

На высоком напряжении. Надеть боты, перчатки и действовать штангой или клещами на соответствующее напряжение.

На воздушных линиях. Если освобождение пострадавшего от тока нельзя осуществить быстро и безопасно иным способом, необходимо замкнуть накоротко провода линии.

Меры первой помощи

а) Если пострадавший в сознании, но до этого был в обмороке или продолжительное время находился под током, ему необходимо обеспечить полный покой до прибытия врача и дальнейшее наблюдение в течение 2—3 часов, а в случае невозможности быстро вызвать врача — срочно доставить пострадавшего в лечебное учреждение.



Фиг. 426. Способ открытия рта у пострадавшего

б) При отсутствии сознания, но сохранившемся дыхании нужно уложить пострадавшего на мягкую подстилку удобно и ровно. Расстегнуть пояс и одежду, обеспечить приток свежего воздуха, удалить лишних людей. Давать нюхать нашатырный спирт с ватки, обрызгивать водой (не изо рта), растирать и согревать тело чистыми суконками, затем тепло укрыть пострадавшего. Срочно вызвать врача.

в) Если пострадавший плохо дышит — очень редко и судорожно, как умирающий, — делать искусственное дыхание.

г) Если рот крепко стиснут, следует его раскрыть, для чего выдвинуть нижнюю челюсть. Чтобы поднять и выдвинуть челюсть, большими пальцами упираются в край ее и выдвигают так, чтобы нижние зубы стояли впереди верхних (фиг. 426).

Если таким образом раскрыть рот не удается, следует осторожно, чтобы не сломать зубы, вставить между ними (между задними коренными зубами) у угла рта дощечку, металлическую пластинку, ручку ложки и т. п. и разжать зубы.

д) При отсутствии признаков жизни (дыхания, сердцебиения, пульса) нельзя все же считать пострадавшего мертвым. Смерть часто бывает кажущейся (мнимой). Признать пострадавшего мертвым может только врач.

При оживлении мнимоумершего дорога каждая секунда. Поэтому первую помощь в виде вышеуказанных мер и искусственного дыхания нужно оказывать немедленно и непрерывно тут же на месте. Переносить пострадавшего в другое место можно в виде исключения только в тех случаях, когда опасность продолжает угрожать пострадавшему или оказывающему помощь.

Искусственное дыхание необходимо производить до положительного результата (оживления) или до появления ясных при-

знаков действительной смерти (появления трупных пятен или трупного окоченения).

Когда пострадавший начнет дышать самостоятельно, продолжать искусственное дыхание вредно, но если дыхание вновь начнет ослабевать или прекращаться, следует немедленно возобновить искусственное дыхание.

Пришедшего в сознание надо уложить, укрыть, согреть, напоить теплым. Дать валериановой настойки 15—20 капель.

Каждый, даже легко пострадавший должен быть в ближайшие часы доставлен к врачу для дальнейшего наблюдения.

Первая помощь при ожогах

1. Легкие ожоги перевязать, как рану, обеззараженным материалом из перевязочного пакета.

2. При тяжелых обширных ожогах не раздевать пострадавшего, не удалять приставших частей одежды, сделать над носилками полог из брезента, спецовки и т. п., не касающийся тела.

Согреть и напоить пострадавшего и обеспечить врачебной помощью.

Способы искусственного дыхания

Первый способ. Помощь оказывает один (фиг. 427).

Положить пострадавшего на живот, головой на одну руку, лицом в сторону, подстелив что-нибудь под лицо. Другую руку вытянуть вперед. Вытянуть язык, но держать его не нужно. Встать на колени над пострадавшим как бы верхом, лицом к его



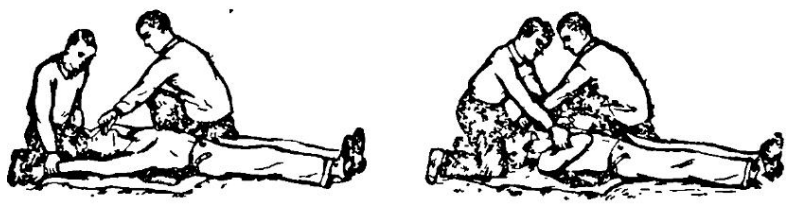
Фиг. 427. Первый способ искусственного дыхания (помощь оказывает один человек)

голове так, чтобы бедра пострадавшего были между коленями оказывающего помощь. Положить свои ладони на спину пострадавшего, на нижние ребра, охватив их с боков сложенными пальцами. Считая «раз», «два», «три», наклонять постепенно свое тело вперед так, чтобы весом своего тела навалиться на свои вытянутые руки и таким образом нажать на нижние ребра пострадавшего (выдох). Не удаляя рук от спины пострадавшего, откинуться назад (вдох).

Сосчитав «четыре», «пять», «шесть», вновь постепенно, не спеша, навалиться тяжестью своего тела на вытянутые руки, считая «раз», «два», «три» и т. д. Нажатия нужно повторять не спеша, равномерно, раз 12—15 в минуту.

При переломе ребер и при ожоге спины этот способ не применяется.

Второй способ (фиг. 428). Если есть помощники, положить пострадавшего на спину, подстелив что-нибудь теплое и подложив под лопатки сверток одежды, чтобы голова запрокинулась назад, раскрыть и очистить рот, вынуть вставные зубы. Вытянуть и удерживать язык, слегка подтягивая его к подбо-



Фиг. 428. Второй способ искусственного дыхания (помощь оказывают несколько человек).

родку. Встать на колени над головой пострадавшего, захватить его руки у локтя и, считая «раз», «два», «три», поднять руки пострадавшего и закинуть их за его голову (вдох).

Считая «четыре», «пять», «шесть», слегка прижать руки к бокам (выдох) и т. д.

При правильно производимом искусственном дыхании получается звук (как бы стон) от прохождения воздуха через дыхательное горло пострадавшего, когда грудная клетка сдавливается и отпускается.

Если звуков нет, это указывает, что язык запал и мешает прохождению воздуха.

При переломе руки или ключицы второй способ не применяется.

При наличии двух помощников искусственное дыхание производят двое, каждый за одну руку, согласованно, по счету; третий держит вытянутый язык.

При всех способах необходимо избегать чрезмерного сдавливания грудной клетки, так как может произойти перелом ребер, а также выдавливание из желудка пищи и закупорка дыхательных путей.

Недопустимо также делать руками пострадавшего грубые и резкие движения во избежание переломов и вывихов.

1. ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Грамм (масса)	*г*	Милливатт	*мвт*
Килограмм (масса)	*кг*	Микроватт	*мквт*
Миллиграмм (масса)	*мг*	Электрон (заряд)	*э*
Грамм (сила)	*Г*	Кулон	*к*
Килограмм (сила)	*кГ*	Ампер-секунда	*а·сек*
Метр	*м*	Ампер-час	*а·ч*
Километр	*км*	Ватт-секунда	*вт·сек*
Сантиметр	*см*	Джоуль	*дж*
Дециметр	*дм*	Ватт-час	*вт·ч*
Миллиметр	*мм*	Гектоватт-час	*гвт·ч*
Квадратный метр	$м^2$	Киловатт-час	*квт·ч*
» сантиметр	$см^2$	Вольтампер	*ва*
» миллиметр	$мм^2$	Киловольтампер	*ква*
Ом	*ом*	Вольтампер реактивный	*вар*
Килоом	*ком*	Киловольтампер реактивный	*квар*
Мегом	*мгом*	Фарада	*ф*
Ампер	*а*	Микрофарада	*мкф*
Килоампер	*ка*	Пикофарада	*пф*
Миллиампер	*ма*	Генри	*гн*
Микроампер	*мка*	Герц	*гц*
Вольт	*в*	Килогерц	*кгц*
Киловольт	*кв*	Мегагерц	*мггц*
Милливольт	*мв*	Вебер	*вб*
Микровольт	*мкв*	Максвелл	*мкс*
Ватт	*вт*	Гаусс	*гс*
Гектоватт	*гвт*	Эрстед	*эр*
Киловатт	*квт*	Калория	*кал*
Мегаватт	*мгвт*	Килокалория	*ккал*

2. БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Наименование	Обозначение
Емкость электрическая	C
Индуктивность; коэффициент самоиндукции	L
Индукция магнитная	B
Количество электричества; заряд электрический	Q, q
Температурный коэффициент электрического сопротивления, электрохимический эквивалент	α
Мощность активная	P
Мощность реактивная	Q
Мощность кажущаяся	S
Мощность мгновенная	p
Напряжение электрическое	U, u
Напряженность магнитного поля	H
Напряженность электрического поля	E
Плотность тока	δ
Поток магнитный	Φ
Потокосцепление магнитное; магнитный поток полный	Ψ
Проводимость активная электрическая	g
Проницаемость электрическая относительная	ε
Проницаемость магнитная относительная	μ
Разность фаз напряжения и тока; потенциал	φ
Сила электродвижущая	E, e
Сопротивление активное электрическое	r
Сопротивление реактивное электрическое	x
Сопротивление полное электрическое	z
Сопротивление удельное электрическое	ρ
Ток	$I\ i$
Фаза начальная	ψ
Частота	f
Частота угловая	ω
Число витков обмотки	w
Коэффициент пропорциональности	c

3. ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

(некоторые ответы даны округленно)

Глава первая

1. 1,35 $н = 137{,}7$ $Г$
2. 18,15 $дн$
3. 9 $см$
4. $4{,}5 \cdot 10^3$ $в/см$
5. $4 \cdot 10^{-8}$ $к$
6. 10^5 $в$
7. 150 $дж$
8. 4 $мкф$
9. $\frac{1}{300}$ $мкф$

Глава вторая

1. 16,55 $ом$
2. 3,6 $ом$
3. 0,1 $мм^2$
4. 10,9 $м$
5. Железо
6. 0,25 $мм^2$
7. 1550 $ом$
8. 2,2 $мм^2$
9. 50° С
10. 13,06 $м$

11. 28 *в*
12. 5,8 *ом*
13. 1600 *ом*
14. 6 *ом*
15. 22,4 *в*; 9,6 *в*; 6,4 *в*
16. 270,4 *ом*
17. 0,8 *ом*
18. 0,88 *ом*
19. 24,5 *ом*
20. 12 *ом*
21. 5 *ом*
22. 7,96 *ом*
23. 2,47 *ом*
24. 4,5 *а*
25. 6 *ом*
26. 9,25 *а*; 2,06 *а*; 3,09 *а*; 5,76 *а*; 2,88 *а*; 1,92 *а*; 3,84 *а*
27. 114,4 *в*
28. 3,81 *а*; 5,71 *а*; 7,62 *а*; 286 *а*
29. 35 $мм^2$
30. 226 *в*
31. 600 *вт · ч*
32. 242 *ом*
33. 25 *а*
34. 4,4 *квт · ч*
35. 1 руб. 49 коп.
36. 24 $мм^2$; 5,46 *квт*; 460 *вт*
37. 17,5 $мм^2$
38. 7,73 *л. с.*
39. 8,8 *квт*

Глава третья

1. 16,9 *мг*
2. 1976 *мг*
3. 109,5 мин.
4. 350 мин.
5. 0,125 *а*
6. 1 *а*; 0,297 *а*
7. 0,5 *а*; 4,2 *а*
8. 2 *а*; 9,99 *в*; 20 *вт*

Глава четвертая

1. 520 *ккал*
2. 378 *кал*
3. 881,6 *кал*; 352,7 *кал*; 1728 *кал*; 4320 *кал*
4. 79,2 *ккал*
5. 38,9; 25,9; 12,9 *кал*
6. 14,7 *ккал*
7. 10 *м*

Глава пятая

1. 159 *а/м*
2. 200 *а/м*
3. $15\pi \cdot 10^{-5}$ *вб*
4. 5 *н*
5. $2 \cdot 10^{-4}$ *н*

Глава шестая

1. 0,375 *в*
2. 12 *в*
3. 1 *кв*
4. 3 *гн*

Глава седьмая

1. 50 *гц*
2. 240 *об/мин*
3. 20 полюсов
4. 66,3 *в*
5. 50 *в*
6. 76 *ом*; 30 *ом*; 69,7 *ом*
7. 62 *в*
8. 11,5 *а*
9. 204 *вт*; 240 *ва*
10. 2,75 *ом*; 2,5 *ом*; 1,14 *ом*; 4400 *ва*; 0,91; 1825 *вар*; 45,5 *в*; 100 *в*
11. 52,1 *а*
12. 200; 160; 120; 80; 40 *квт*
13. 83,5 *в*; 8,35 *ом*; 2,5 *ом*; 7,96 *ом*
14. 1,5 *ом*; 2 *ом*; 2,5 *ом*; 160 *ва*; 96 *вт*; 128 *вар*
15. 2400 *ва*; 1920 *вт*; 1440 *вар*; 6 *ом*; 4,8 *ом*; 3,6 *ом*; 96*в*; 72 *в*
16. 8941 *вт*
17. 960 *вт*; 1760 *ва*; 1472 *вар*; 27,5 *ом*; 23 *ом*; 0,545; 120 *в*; 184 *в*
18. 19,2 *ом*; 14,4 *ом*; 24 *ом*
19. 0,33; 119,5 *в*; 50 *вт*; 150 *вт*
20. 59,75 *в*; 18 *вт*; 18 *вт*

Глава восьмая

1. 127 *в*; 35,4 *а*
2. 8,65 *а*
3. 50 *квт*; 40 *квт*; 30 *квт*; 10 *квт*
4. 17,75 *а*
5. 4774 *вт*; 6,2 *ква*
6. 3733 *вт*; 11,2 *квт*
7. 240 ламп
8. 7,25 *а*
9. 2,59 *квт*
10. 323,5 *вт*
11. 276 ламп

Глава девятая

1. 17,4; 12,65 *в*
2. 0,485 *а*
3. 0,26 *а*
4. 94%
5. 6,07 *а*
6. 534 витка
7. 4,78 *а*; 188 *а*
8. 10,4 *а*; 2,4 *а*

Глава четырнадцатая

1. Δ абс $= -0{,}1$ *а*
   Δ отн $= -0{,}01$
   Δ прив $= 0{,}005$
2. 0,004 *ом*
3. 78 *а*
4. 14 *ком*
5. 5340 *ом*
6. Δ абс $= -0{,}25$ *вт*
   Δ оти $= 0{,}0042$
7. 2850 *в*
8. 120 *а*
9. 420 *а*
10. 45 *квт*
11. 142,56 *квт*
12. 18 *квт*

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абсолютная погрешность 423
— практическая система единиц МКСА 18
— практическая рационализованная система МКСА 18
— система единиц 17
— электромагнитная система единиц 17
— электростатическая система единиц 17
Абсолютное удлинение 91
Абсолютный ампер 18
— ом 17
Автотрансформатор 303, 502
Аккумуляторная батарея 119, 524, 525
Активная проводимость 234
— составляющая 234
— энергия 465
Акцепторная примесь 101
Алюминий 93, 95
Альдрей 93
Альни 170
Альнико 170
Альниси 170
Альсифер 169
Ампер-виток 155
Амперметр 53, 74, 424
Антипротон 15, 17
Аппаратура управления электродвигателя 490
Аргон 133
Арретир 422
Асбест 43
Асбоцемент 44
Асинхронный двигатель 308
— — с короткозамкнутым ротором 318
— — с фазным ротором 323
Атом 8,9

Б

Бакелит 44
Барабанный контроллер 494
Барий 409
Бесколлекторный двигатель 308
Биметаллическая пластина 139, 140
Боксит 114
Бор 100
Броневой трансформатор 293
Бронза 92, 95
Брызгозащитная электрическая машина 480

В

Вариометр самоиндукции 190
Ватт 74
Ваттметр 74
Ватт-секунда 75
Векторная величина 23
— диаграмма 202
Вентиль 411
Взаимоиндукция 173, 188
Взрывобезопасная электрическая машина 480
Вибрационный прибор 425
Вихревый ток 181, 182
Внешняя характеристика 375
Водозащищенная электрическая машина 480
Водород 109
Водородное охлаждение 336
Возбудитель 335
Воздушное охлаждение 336
Волновая обмотка 363
Вольт 33
Вольтметр 59, 74, 424
Вольфрам 94, 95
Вольфрамит 94
Вольфрамовая сталь 170
Вращающийся преобразователь 396
Временное сопротивление на разрыв 91
Вторичная обмотка 279
Второй закон Кирхгофа 79
— — Ньютона 187
— — Фарадея 110
Выпрямитель 401

Г

Газотрон 401, 402
Гален 100
Галовакс 44
Гальванический элемент 115
Гальваностегия 112
Гектоватт 74
Гектоватт-час 75
Гелий 12
Генератор постоянного тока 350
— реактивного тока 347
— с независимым возбуждением 371, 372
— с параллельным возбуждением (шунтовой) 372
— с последовательным возбуждением (сериесный) 372
— с последовательным возбуждением 379
— с постоянным магнитом 371
— с самовозбуждением 371
— со смешанным возбуждением (компаундный) 372
Генераторное торможение у асинхронных двигателей 515
Генри 186
Германий 100
Германиевый полупроводниковый выпрямитель 404
Герметическая машина 480
Гетинакс 44
Гистерезис 158
Глинозем 114
ГОЭЛРО 1, 2
Грамм-эквивалент 111
Групповой электропривод 476

Д

Двигатель-генератор 396
Двигатель с мягкой (падающей) характеристикой 481
— с несколькими ступенями скорости 481
— с постоянной скоростью вращения 481
— с регулировкой скорости 481
— с твердой характеристикой 481
Двойной мост 469
Двухклеточный ротор 320
Деполяризатор 116
Детектор 404
Детекторный прибор 425
Джоуль 18
Диамагнитное вещество 156
Дина 17
Динамическое торможение 515
Диод 404
Диполь 29
Диэлектрик 16, 38
Диэлектрическая потеря 41
Донорная примесь 101
Дополнительный полюс 370
Древесина 44
Дырочная проводимость 100, 405

Е

Емкость конденсатора 34
Емкостное падение напряжения 221
— сопротивление 221
Емкость элемента 118

Ж

Железо 109
Жидкостный насос 484
— реостат 452

З

Закон Био и Савара 148, 154, 165
— Джоуля — Ленца 128
— Кулона 19
— Ома 62
— полного тока 153, 154
Закрытая электрическая машина 480
Запретный уровень 13
Зарядный агрегат 529
Защита электрических двигателей 486, 488, 489
Защищенная электрическая машина 479
Звезда 260, 338
Золото 97

И

Измерение активной электрической мощности 453
— — энергии 460
— коэффициента мощности 464
— реактивной энергии 463
— сопротивлений 466
Измерительные клещи 446
Измерительный трансформатор 439
— — напряжения 345, 440
— — тока 444
Изотоп 8
Изолятор 16

Изоляция электрических машин 479
Инвертор 292
Индукционный измерительный прибор 432
— прибор 425
Индуктор 332
Индуктированная э. д. с. 342
Индуктивное падение напряжения 217
— сопротивление цепи 217
Индуктивность 186
Индукционная катушка 192
Индуцированный заряд 28
Ион 11
Ионизация 11
Ионная проводимость 108

К

Кальций 409
Канифоль 45
Каплезащитная электрическая машина 480
Карбонильное железо 168
Карборунд 100
Каскадный преобразователь 399
Катод 9
Картон электротехнический 45
Каучук 45
Кентрон 401, 407, 409
Квант 21
Квантовая физика 13
Квантовый уровень 13
Кенотрон — ламповый выпрямитель 407
Кери 42
Киловатт 74
Киловатт-час 75
Киловольтметр 59
Килоом 55
Кобальтовая сталь 170
Кобальтомолибденовая сталь 170
Коллектор 352
Компрессор 484
Конденсатор переменной емкости 35
— постоянной емкости 34
Константан 96, 98
Командоконтроллер 494
Коммутация 368
Компенсационная обмотка 371
Контактор 492
Контроллер 494
Короткое замыкание 77
Корректор 422
cos φ (косинус фи) 347, 348
Коэрцитивная сила 158
Коэффициент амплитуды 210
— связи катушек 190
— трансформации 280, 439
— трансформатора тока 440, 445
— формы кривой 210
— шунтирования 449
Кремний 100
Кулачковый контроллер 494
Кулон 20, 27

Л

Лак электроизоляционный 45
Лакоткань 46
Ламповый реостат 452
Легированная сталь 170
Линейное напряжение 261
Линейный провод 260
Линия магнитной индукции 149
Листовая электротехническая сталь 168
Литероид 49, 360
Люминесцентная лампа 134

М

Манганин 96, 98
Мегаватт 74
Магний 93
Магнико 170
Магнитная индукция 155, 166
— индукционная линия 145, 146, 149
— линия 166
— проницаемость 148, 156, 157
— цепь 159
Магнитно-твердый материал 170
Магнитное поле 145, 147
— сопротивление 155
Магнитодиэлектрик 169
Магнитно-мягкий материал 167
Магнитоэлектрический измерительный прибор 425
Магнитный поток 149 155, 159, 339
— — машины 340
— пускатель 496
Магнитоэлектрический генератор 371
Машина с естественным охлаждением 480
— с искусственной вытяжкой или нагнетательной вентиляцией 480
— с независимой вентиляцией 480
— с самовентиляцией 480
Мег 55
Мегомметр 470
Меднозакисный выпрямитель 401, 403
Медь 95, 109
Международная практическая система 17
Международный ампер 18
— ом 17
Мезон 15, 17

Металлический выпрямитель 401
— многоанодный выпрямитель 417
— проводник 88
— ртутный выпрямитель 416
Метод контурных токов 86
— наложения 80
— узлового напряжения 82
Механический выпрямитель 401
Механическое торможение 512
Миканит 47, 333
Микафолий 47
Микроамперметр 426
Микрогенри 186
Микрофарада 33
Милливольтметр 59
Многодвигательный привод 476
Многофазная система 256
Многофазный ток 256
Молекула 8
Молибден 95, 407, 409
Мост сопротивления 424
Мощность 74
Мрамор 46
Мусковит 47
Мышьяк 100

Н

Нагрузка трансформатора 285
Намагничивающая сила 155
Напряжение 30
— короткого замыкания 288
Напряженность электрического поля 22
Начальная фаза 202
Нейзильбер 98
Нейтральный провод 260
Нейтрино 15
Нейтрон 12
Немагнитный материал 170
Непроводник 16
Неявнополюсный ротор 333, 335
Никелин 55, 387
Никель 95
Нихром 97, 98
Номинальный коэффициент трансформации напряжения 439
Номинальное показание 423
Нулевые точки 260
Ньютон 18

О

Обратимость 384
Обратная электродвижущая сила 386
Обратное зажигание 413
Обмотка двухслойная 326
Обмотка однослойная 326
Одиночный электропривод 476
Однополупериодное выпрямление 410
Однофазный асинхронный двигатель 330
— переменный ток 195, 454, 461, 463
— трансформатор 440
Одноякорный преобразователь 396, 397
Оксидный катод 409
Олово 94, 95
Омметр 424
Омсантиметр 40
Опыт короткого замыкания 288
Основная приведенная погрешность 424
Остаточная индукция 157
Остаточный магнетизм 157, 158
Открытая электрическая машина 479
Относительная магнитная проницаемость 148, 160, 167
— погрешность 423
— в коэффициенте трансформации 439
— электрическая проницаемость 20
Относительное удлинение 91
Охлаждение электрических машин 480

П

Потеря напряжения 63
Пакетный выключатель 490
Параллельная работа синхронных генераторов 343
Параллельное соединение 69
Парамагнитное вещество 156
Парафин 46
Первый закон Кирхгофа 67, 79
— — Фарадея 109
Пермендюр 169
Первичная обмотка 278
Передаточное число 460
Переключатель 489
Пермаллой 171, 427
Петлевая обмотка 362
Петля гистерезиса 167
Пикофарада 33
Плавкий предохранитель 141
Пластическая масса 46
Пластинчатый предохранитель 141, 486
Платина 95
Плотность тока 53
Поверхностная плотность 26
Поверхностный разряд 43
— эффект 219
Подпятник 421
Позитрон 15
Полная проводимость 235
Полупроводник 97

Поляризация диэлектрика 29
Поражение электрическим током 538
Последовательное соединение 67
Постоянная счетчика 461
Постоянный магнит 162
— ток 401
Потокосцепление 181
Поток вектора магнитной индукции 149
Поток ротора 340
Правило «буравчика» 179, 341
— левой руки 164, 386, 425
— Ленца 178, 215, 369
— правой руки 174, 360
Правила техники безопасности 536
Прессшпан 360
Прибор вибрационной системы 437
— детекторной системы 436
— термоэлектрической системы 435
Приведенная погрешность 423
Пробивная напряженность 42
Пробивное напряжение 42
Пробой 34
Пробочный предохранитель 141, 487
Проводник 13
Пропиточный и заливной состав 47
Противоэлектродвижущая сила 386
Протон 12
Пусковой реостат 387

Р

Радиан 201
Радиатор 294
Радиоактивность 9
Разрушающая нагрузка 91
Реактивная мощность 347
Реактивная проводимость 235
— слагающая напряжения 217
— составляющая тока 234
— энергия 465
Реактивное сопротивление емкости 221
— сопротивление индуктивности 217
Реактивный ток 347
Реакция якоря 340, 367
Регулировочный реостат 372
Регулировочная характеристика 343
Режим заряд — разряд 530
— постоянного подзаряда 530
Резонанс напряжения 232
Рентген 9
Рентгеновские лучи 9
Реостат 54, 372, 450
— со скользящим контактом 450
Реотан 139
Ротор 308
— с глубоким пазом 322
— с двойной алюминиевой клеткой 322
Ртуть 94, 95
Ртутный выпрямитель 401, 411, 415
Рубильник 490
Рутил 41
Рычажный реостат 452

С

Самоиндукция 173
Самосинхронизация 346
«Свеча» Яблочкова 137
Свинец 94, 95, 109
Свинцовокислотный аккумулятор 119
Селен 100
Селеновый выпрямитель 401, 403
Сера 100
Серебро 95
Силовой контроллер 494
Синусоидальная переменная величина 201
Синхронизация 346
Синхронный генератор 332, 347
— двигатель 347
— компенсатор 348
Скалярная величина 23
Скольжение двигателя 311
Слюда 47
Смешанное соединение 72
Соединение звездой 260
— треугольником 267
Соленоид 159
Сталинит 47
Сталь 95,
Станиоль 94
Статор 308, 333
Стеатит 48
Стекло 47
Стеклянный выпрямитель 401
— ртутный выпрямитель 411, 416
Стержень 293
Стержневой трансформатор 293
Строчной 409
Сульфатация 122
Сульфид 100
Счетчик 424

Т

Тантал 408
Твердый выпрямитель 401
Текстолит 48
Теллур 100
Температурный коэффициент сопротивления 57, 90
Теорема Гаусса 23
Тепловой измерительный прибор 430
— прибор 425
Тепловое реле 139
Теплопроводность 90

Термопара 143
Термометр сопротивления 57
Термоэлектрический прибор 425
— ток 91
Термоэлектродвижущая сила 91, 143
Термоэлектричество 143
Термоэлемент 143
Термоэлектронная эмиссия 408
Термоэлектронный эффект 12
Ток насыщения 408
— поляризация 39
— проводимости 41
— утечки 39
— холостого хода 283
Токарный станок 483
Токи Фуко 182
Торможение электрических двигателей 512
Трансформатор 278
Трансформаторное масло 46
Трехфазная симметрическая система 259
Трехфазный переменный ток 257, 456, 462, 463
— трансформатор 297, 440
Треугольник напряжений 224
— сопротивлений 226
Трубчатый предохранитель 141, 487

У

Углерод 100
Угловая погрешность 439
— скорость 201
Угол диэлектрических потерь 41
Угловая частота 201
Углеродистая сталь 170
Удельная потеря 167
Удельное объемное сопротивление 40
— поверхностное сопротивление 40
— сопротивление 55, 89
— электрическое сопротивление 89
U-образная характеристика машины 346
Уравнительный ток 300

Ф

Фаза 201, 256
— генератора 257
Фазная обмотка 257
Фазное напряжение 261
Фазный ток 262
— угол 201, 202
Фазометр 424
Фазоуказатель 345
Фарада 20
Фарфор электротехнический 48
Ферромагнитный материал 159, 427
Ферромагнитное вещество 156
Фехраль 97, 98
Фибра 48
Физическая нейтраль 367
Флогопит 47
Фосфор 100
Фотон 21
Фотоэлектрический эффект 11

Х

Характеристика синхронного генератора 341
— холостого хода 373
Химический эквивалент 110
Холостая работа трансформатора 282
Хромаль 97
Хромистая сталь 170

Ц

Церезин 49
Цинк 95

Ч

Частотомер 424
Четырехплечий мост сопротивлений 468
Чистое железо 157
Чугун 95

Ш

Шаг обмотки 327
Шелк 49
Шеллак 49
Шифер 49
Штепсельный реостат 453

Щ

Щелочно-земельный металл 409
Щелочный аккумулятор 122

Э

Эбонит 49
Э. д. с. самоиндукции 215, 369
Эквипотенциальная поверхность 31

Электризация 32
Электрификация 1
Электрическая дуга 134
Электрическая емкость 32, 33
— лампа накаливания 132
Электролитическая медь 114
Электрическая проницаемость 19, 39
— — диэлектрика 35
— прочность 39, 42
— силовая линия 25, 32
— цепь 52
— эрозия 138
Электрический аккумулятор 119
— конденсатор 33
— нагревательный прибор 139
— привод 475
— проводник 16
Электрическое поле 21, 32
— сопротивление 54
— торможение с возвратом энергии 514
Электричество 17
Электродвигатель с параллельным возбуждением 391, 392
— с последовательным возбуждением 393
— со смешанным возбуждением 394
Электродвижущая сила 59
Электродинамический прибор 424
Электроизмерительный прибор 421, 424
Электролиз 106
Электролит 112
Электролитический выпрямитель 401
Электрическое железо 168
Электромагнетизм 145
Электромагнит 151
Электромагнитная индукция 172, 350
— мощность 316
Электромагнитный прибор 424
— измерительный прибор 427
Электрон 9, 15, 17
Электронная проводимость 108
Электропроводность 114
Электросварка 137
— методом сопротивления 138
Электростатическая индукция 28
Электротехнический уголь 94
Электрохимический эквивалент 109
Элементный коммутатор (переключатель) 528
Эмиссионный ток 409
Энергетический уровень 14
Эрг 17

Я

Явление короны 43
Явнополюсный ротор 333
Якорь 332, 350

УКАЗАТЕЛЬ ИМЕН

Бенардос Н. Н. 5, 137
Бно 147, 165
Доливо-Добровольский М. О. 5, 308 475, 476
Лачинов Л. А. 5
Ленц Э. Х. 4, 178
Лодыгин А. Н. 4
Ломоносов М. В. 4, 15
Максвелл Джемс Клерк 5, 21
Мандельштам Л. И. 10
Менделев Д. И. 8
Никитин В. П. 138
Папалекси Н. Д. 10
Патон Е. О. 138
Петров В. В. 6, 134
Пироцкий Ф. А. 4
Попов А. С. 5
Рихман Г. В. 15
Савар 149, 165
Славянов Н. Г. 5, 137
Столетов А. Г. 4, 11, 159
Усагин И. Ф. 4, 278, 475, 476
Фарадей М. 5
Хренов К. К. 138
Чиколев В. Н. 137, 475
Шиллинг П. Л. 4
Яблочков П. Н. 4, 135, 278, 475
Якоби Б. С. 6, 113, 165, 384, 475

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение 3

Глава первая. **Электростатика**

§ 1. Молекулы и атомы 8
§ 2. Общие понятия об электричестве и электронной теории 9
§ 3. Системы единиц измерения электрических и магнитных величин 17
§ 4. Закон Кулона 19
§ 5. Электрическое поле 21
§ 6. Проводник в электрическом поле 27
§ 7. Диэлектрик в электрическом поле 29
§ 8. Потенциал и разность потенциалов 30
§ 9. Электрическая емкость 32
§ 10. Диэлектрики 38
§ 11. Удельное сопротивление 39
§ 12. Электрическая проницаемость 41
§ 13. Угол диэлектрических потерь 41
§ 14. Электрическая прочность 42
§ 15. Главнейшие электроизоляционные материалы 43
Задачи для самостоятельного решения 49
Контрольные вопросы 50

Глава вторая. **Основные законы постоянного тока**

§ 16. Понятие об электрическом токе 51
§ 17. Электрическая цепь и ее элементы 52
§ 18. Величина тока. Плотность тока 52
§ 19. Сопротивление и проводимость проводников. Зависимость сопротивления проводников от физических условий 54
§ 20. Электродвижущая сила источника электрической энергии. Напряжение 59
§ 21. Закон Ома 60
§ 22. Соединение проводников между собой. Первый закон Кирхгофа . 67
§ 23. Работа и мощность электрического тока 73
§ 24. Короткое замыкание 76
§ 25. Второй закон Кирхгофа. Применение законов Кирхгофа для расчета электрических цепей 77
§ 26. Метод наложения 80
§ 27. Метод узлового напряжения 82
§ 28. Метод контурных токов 86

§ 29. Металлические проводники 88
§ 30. Основные характеристики проводниковых материалов 89
§ 31. Проводниковые материалы 91
§ 32. Материалы высокой проводимости 92
§ 33. Различные металлы, применяемые в электротехнике 94
§ 34. Электротехнический уголь 94
§ 35. Сплавы высокого сопротивления 96
§ 36. Полупроводники 97
Задачи для самостоятельного решения 103
Контрольные вопросы 105

Глава третья. Химические действия тока и химические источники э. д. с.

§ 37. Электролиз 106
§ 38. Первый закон Фарадея 109
§ 39. Второй закон Фарадея 110
§ 40. Техническое применение электролиза 112
§ 41. Гальванические элементы 115
§ 42. Электрические аккумуляторы 119
§ 43. Свинцово-кислотные аккумуляторы 119
§ 44. Щелочные аккумуляторы 122
§ 45. Соединение источников э. д. с. 124
Задачи для самостоятельного решения 127
Контрольные вопросы 127

Глава четвертая. Тепловые действия электрического тока

§ 46. Нагрев проводника электрическим током 128
§ 47. Закон Джоуля—Ленца 128
§ 48. Температура нагрева проводника электрическим током 130
§ 49. Электрические лампы накаливания 132
§ 50. Электрическая дуга 134
§ 51. Электросварка 137
§ 52. Электрические нагревательные приборы 139
§ 53. Тепловые реле 139
§ 54. Плавкие предохранители 141
§ 55. Соединение проводников 142
§ 56. Термоэлектричество. Термопары 143
Задачи для самостоятельного решения 143
Контрольные вопросы 144

Глава пятая. Электромагнетизм

§ 57. Магнитное поле вокруг прямолинейного проводника с током . . 145
§ 58. Круговой проводник с током 149
§ 59. Соленоид. Электромагнит 150
§ 60. Закон полного тока 153
§ 61. Ферромагнитные, парамагнитные и диамагнитные тела 156
§ 62. Ферромагнитные тела в магнитном поле 156
§ 63. Гистерезис 158

§ 64. Магнитные цепи и их расчет 159
§ 65. Постоянные магниты 162
§ 66. Проводник с током в магнитном поле 163
§ 67. Принцип действия электродвигателя 165
§ 68. Взаимодействие проводников с током 166
§ 69. Магнитные и немагнитные материалы 167
Задачи для самостоятельного решения 171
Контрольные вопросы 171

Глава шестая. **Электромагнитная индукция**

§ 70. Получение индуктированной электродвижущей силы (э. д. с.) . . . 172
§ 71. Направление и величина индуктированной э. д. с. 173
§ 72. Принцип действия генератора 177
§ 73. Правило Ленца 178
§ 74. Вихревые токи 181
§ 75. Э. д. с. самоиндукции и индуктивность цепи 183
§ 76. Взаимоиндукция 188
§ 77. Принцип действия трансформатора 191
§ 78. Индукционная катушка 192
Задачи для самостоятельного решения 193
Контрольные вопросы 193

Глава седьмая. **Однофазный переменный ток**

§ 79. Получение переменного тока 195
§ 80. Основные понятия и определения, относящиеся к переменным токам 199
§ 81. Синусоидальные переменные величины 200
§ 82. Зависимость частоты генератора переменного тока от числа пар полюсов и скорости вращения ротора 206
§ 83. Действующее значение переменного тока 207
§ 84. Среднее значение переменного тока 209
§ 85. Цепь переменного тока с активным сопротивлением 210
§ 86. Цепь переменного тока с индуктивностью 213
§ 87. Поверхностный эффект 219
§ 88. Цепь переменного тока, содержащая емкость 219
§ 89. Последовательное соединение активного и индуктивного сопротивлений (r, x, L) 223
§ 90. Треугольник напряжений 225
§ 91. Треугольник сопротивлений 226
§ 92. Закон Ома для цепи с активным сопротивлением и индуктивностью (r, L) 228
§ 93. Последовательное соединение активного сопротивления и емкости (r, C) 229
§ 94. Последовательное соединение активного сопротивления, индуктивности и емкости (r, L, C) 231
§ 95. Проводимость при переменном токе 234
§ 96. Разветвленные цепи переменного тока 235

§ 97. Колебательный контур 241
§ 98. Треугольник мощностей 244
§ 99. Коэффициент мощности («косинус фи») 246
§ 100. Необходимость увеличения «косинуса фи» потребителей 248
§ 101. Причины, влияющие на величину «косинуса фи» потребителя, и меры, принимаемые для увеличения «косинуса фи» 250
Задачи для самостоятельного решения 254
Контрольные вопросы 255

Глава восьмая. **Трехфазный переменный ток**

§ 102. Многофазные токи 256
§ 103. Трехфазный переменный ток 257
§ 104. Соединение звездой 260
§ 105. Соединение треугольником 267
§ 106. Мощность трехфазного переменного тока 272
§ 107. Создание вращающегося магнитного поля при помощи трехфазного тока 274
Задачи для самостоятельного решения 277
Контрольные вопросы 277

Глава девятая. **Трансформаторы**

§ 108. Общие сведения о трансформаторах 278
§ 109. Холостая работа трансформатора 282
§ 110. Нагрузка трансформатора 285
§ 111. Опыты холостого хода и короткого замыкания трансформатора . 288
§ 112. Роль трансформатора при передаче электрической энергии на расстояние 290
§ 113. Устройство и типы трансформаторов 293
§ 114. Трехфазные трансформаторы 297
§ 115. Параллельная работа трансформаторов 300
§ 116. Автотрансформаторы 303
Задачи для самостоятельного решения 306
Контрольные вопросы 307

Глава десятая. **Асинхронные двигатели**

§ 117. Общие положения 308
§ 118. Принцип действия асинхронного двигателя 309
§ 119. Вращающий момент асинхронного двигателя 313
§ 120. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 318
§ 121. Асинхронный двигатель с фазным ротором 323
§ 122. Свойства асинхронных двигателей и области их применения . . 324
§ 123. Устройство обмоток статора и ротора асинхронных двигателей . 326
§ 124. Однофазные асинхронные двигатели 330
Контрольные вопросы 331

Глава одиннадцатая. **Синхронные машины**

§ 125. Синхронные генераторы 332
§ 126. Устройство синхронных генераторов 333
§ 127. Реакция якоря синхронного генератора 340

§ 128. Характеристики синхронных генераторов 341
§ 129. Параллельная работа синхронных генераторов 343
§ 130. Устройство и работа синхронного двигателя 347
§ 131. Свойства синхронных электродвигателей и области их применения 348
Контрольные вопросы 349

Глава двенадцатая. **Машины постоянного тока**

§ 132. Устройство генератора постоянного тока 350
§ 133. Назначение и устройство коллектора в генераторах постоянного тока 354
§ 134. Обмотка якоря 360
§ 135. Величина э. д. с., индуктированной в якоре генератора постоянного тока 363
§ 136. Реакция якоря. Коммутация. Дополнительные полюса 367
§ 137. Типы генераторов постоянного тока 371
§ 138. Генератор с независимым возбуждением 372
§ 139. Генератор с параллельным возбуждением 376
§ 140. Генератор с последовательным возбуждением 379
§ 141. Генератор со смешанным возбуждением 380
§ 142. Параллельная работа генераторов с параллельным возбуждением 382
§ 143. Работа машины постоянного тока в качестве электрического двигателя 384
§ 144. Назначение коллектора у электродвигателей постоянного тока . . 385
§ 145. Противоэлектродвижущая сила якоря 386
§ 146. Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока . 389
§ 147. Реакция якоря двигателей постоянного тока 389
§ 148. Электродвигатель с параллельным возбуждением 391
§ 149. Электродвигатель с последовательным возбуждением 393
§ 150. Электродвигатель со смешанным возбуждением 395
§ 151. Вращающиеся преобразователи 396
Контрольные вопросы 399

Глава тринадцатая. **Выпрямители**

§ 152. Общие сведения о выпрямителях 401
§ 153. Меднозакисные (купроксные) выпрямители 402
§ 154. Селеновые выпрямители 403
§ 155. Германиевый полупроводниковый выпрямитель 404
§ 156. Схемы включения твердых выпрямителей 406
§ 157. Кенотрон — ламповый выпрямитель 407
§ 158. Стеклянные ртутные выпрямители 411
§ 159. Металлические ртутные выпрямители 416
Контрольные вопросы 420

Глава четырнадцатая. **Электроизмерительные приборы и техника электрических измерений**

§ 160. Общие замечания об электроизмерительных приборах 421
§ 161. Классификация электроизмерительных приборов 424

Стр.

§ 162. Магнитоэлектрические измерительные приборы 425
§ 163. Электромагнитные измерительные приборы 427
§ 164. Электродинамические измерительные приборы 429
§ 165. Тепловые измерительные приборы 430
§ 166. Индукционные измерительные приборы 432
§ 167. Приборы термоэлектрической системы 435
§ 168. Приборы детекторной системы 436
§ 169. Приборы вибрационной системы 437
§ 170. Измерительные трансформаторы 439
§ 171. Измерительные трансформаторы напряжения 440
§ 172. Измерительные трансформаторы тока 444
§ 173. Измерение тока в цепи 448
§ 174. Измерение напряжения 450
§ 175. Реостаты 451
§ 176. Измерение активной электрической мощности 453
§ 177. Измерение активной электрической энергии 460
§ 178. Измерение реактивной энергии 463
§ 179. Измерение коэффициента мощности 464
§ 180. Измерение сопротивлений 466
Задачи для самостоятельного решения 473
Контрольные вопросы 474

Глава пятнадцатая. Электрический привод

§ 181. Общие сведения 475
§ 182. Характеристики электродвигателей 477
§ 183. Режимы работы электрических двигателей 477
§ 184. Изоляция электрических машин 479
§ 185. Формы исполнения электрических машин 479
§ 186. Охлаждение электрических машин 480
§ 187. Классификация двигателей по механической (скоростной) характеристике 481
§ 188. Выбор мощности двигателей 481
§ 189. Защита электрических двигателей 485
§ 190. Защита электродвигателей плавкими предохранителями 486
§ 191. Защита электродвигателей автоматическими выключателями . . 488
§ 192. Защита электродвигателей тепловыми реле 489
§ 193. Аппаратура управления электродвигателями 490
§ 194. Рубильники, переключатели, пакетные выключатели 490
§ 195. Контакторы 492
§ 196. Контроллеры 494
§ 197. Кнопки управления 496
§ 198. Магнитные пускатели 496
§ 199. Способы пуска асинхронных двигателей 499
§ 200. Способы пуска синхронных двигателей 503
§ 201. Перемена направления вращения электрических двигателей (реверсирование) 505
§ 202. Регулирование скорости вращения электрических двигателей . 507

§ 203. Спецнальные схемы пуска в ход н регулирования скоростн вращення двнгателей постоянного тока большой мощностн 510
§ 204. Торможенне электрнческих двнгателей 512
§ 205. Схемы управления электродвигателямн прн помощн электромагнитных аппаратов 515
§ 206. Управление электродвигателямн при помощи контроллеров . . . 521
Контрольные вопросы 523

Глава шестнадцатая. **Аккумуляторные батареи**

§ 207. Общие сведения 524
§ 208. Элементные коммутаторы (переключателн) 528
§ 209. Потребители аккумуляторных батарей 528
§ 210. Зарядные агрегаты 529
§ 211. Режим работы аккумуляторных батарей 530
§ 212. Помещенне для аккумуляториых батарей 535
Контрольные вопросы 535

Глава семнадцатая. **Техника безопасностн в электрических установках**

§ 213. Основные правила техннкн безопасности 536
§ 214. Поражение электрическим током 538
§ 215. Правнла подачн первой помощи пострадавшим от электрического тока 539
Приложечия
1. Основные сокращенные обозначения физических единиц . . . 543
2. Буквенные обозначення основных электрических велнчнн . . 544
3. Ответы к задачам для самостоятельного решення 544
Предметный указатель 546
Указатель нмен 552

Кузнецов Михаил Иванович

Основы электротехники. Под ред. д-ра техн. наук С. В. Страхова. 9-е и: испр. М., «Высшая школа», 1964.
560 стр. с илл.

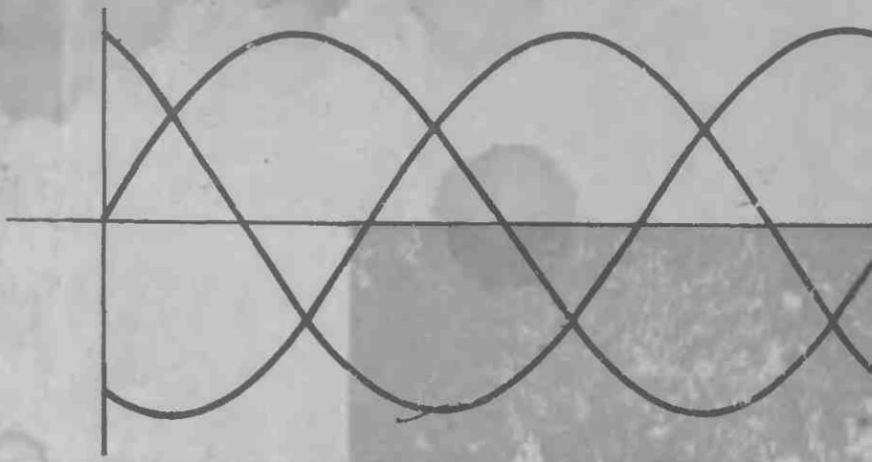
6П

Редактор *А. А. Знаменский*
Художник *И. Н. Веселов-Новицкий*
Техн. редактор *С. П. Передерий*
Корректоры *Р. К. Иванова* и *Е. И. Герасимова*

Т-03647	Сдано в набор 6/XII 1963 г.	Подп. к печ. 9/IV 196
Формат бум. 60×90¹/₁₆—35 ф. п. л.		Уч.-изд. 33,2
Уч. № 16	Тираж 75 000	Заказ № 2215	Цена 93

Набрано в Московской тип. № 8 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати,
Хохловский пер., 7.

Отпечатано в типографии «Красный пролетарий» Политиздата.
Москва, Краснопролетарская, 16.



М. И. КУЗНЕЦОВ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ВЫСШАЯ ШКОЛА