

А. С. МОЩЕВИТИН

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. С. МОЩЕВИТИН
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1980

А. С. МОЩЕВИТИН

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Издание второе, исправленное и дополненное

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
МОСКВА — 1960

Инженер-полковник **Мошевитин А. С.** **Электротехника**, издание второе, исправленное и дополненное.

В учебнике изложены теоретические основы электротехники и вопросы практического использования электрической энергии. Рассмотрены основные вопросы теории постоянного и переменного тока, даны краткие сведения о химических источниках электрической энергии, электрических машинах, полупроводниковых приборах, выпрямителях, электрических измерениях и магнитных усилителях. Особое внимание уделено физической сущности рассматриваемых явлений и процессов.

Антон Саввич Мошевитин

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Редактор инженер-подполковник **А. В. Врублевский**

Технический редактор **Р. Ф. Аникина**

Корректор **Т. Г. Евстифеева**

Сдано в набор 24.9.59 г.

Подписано к печати 4.3.60 г.

Г-62388

Формат бумаги 60×92¹/₁₆ — 33¹/₂ печ. л. = 33¹/₂ усл. печ. л. = 31,416 уч.-изд. л.

Военное издательство Министерства обороны Союза ССР

Москва, К-9, Тверской бульвар, 18

Изд. № 5/2161

Цена 8 р. 85 к.

Зак. № 460

2-я типография Военного издательства Министерства обороны Союза ССР
Ленинград, Д-65, Дворцовая пл., 10

ВВЕДЕНИЕ

Предметом электротехники является установление и систематизация законов, которым подчиняются электрические явления. Лишь зная эти законы, можно обеспечить технически правильное применение электрической энергии.

Начало развития электротехники относится ко второй половине XVIII и первой половине XIX веков, когда трудами русских и иностранных ученых были заложены основы теоретической и практической электротехники.

Практическое значение и широкое развитие электротехника получила со второй половины XIX века, когда после ряда открытий и изобретений электрическая энергия стала быстро внедряться во все области жизни, вытесняя другие виды энергии.

За сравнительно короткий срок своего существования электротехника достигла больших успехов. Достаточно привести такие области ее применения, как промышленность, освещение, проводная связь, кино, радио, телевидение, чтобы понять роль и значение электротехники в жизни и деятельности человека.

Такие успехи электротехники объясняются тем, что электрическая энергия легко преобразуется в другие виды энергии, что ее сравнительно легко и в любом количестве можно подводить к приемникам и, наконец, что ее можно передавать по проводам на значительные расстояния.

Можно без преувеличения сказать, что современный технический прогресс во многом зависит от теоретического и практического развития электротехники.

В деле успешного развития электротехники почетная роль принадлежит русской науке, нашим отечественным ученым, инженерам и техникам.

Русская наука XVIII и XIX веков развивалась в очень тяжелых условиях. Господствующие классы царской России не верили в творческие силы русского народа и раболепно преклонялись перед Западом. В правительственных и культурно-просветительных учреждениях дореволюционной России

было засилье иностранцев, которые часто сознательно тормозили развитие русской науки и культуры. Однако, невзирая на все эти трудности, русская наука XVIII и XIX веков успешно развивалась.

Великий русский народ выдвинул из своей среды славную плеяду ученых и изобретателей, которые внесли большой вклад в сокровищницу науки. В частности, русские ученые XVIII и XIX веков сыграли большую роль в развитии электротехники, обогатив мировую науку рядом важнейших открытий и изобретений.

Основоположителем русской науки вообще и в частности науки об электричестве является гениальный русский ученый М. В. Ломоносов. Ломоносову принадлежит ряд трудов, в которых он изложил созданную им передовую для своего времени теорию электричества. В этих трудах электричество рассматривалось им как особая форма движения материи.

Исследования электрических явлений после Ломоносова продолжили многие русские ученые.

Профессор Петербургской медико-хирургической академии В. В. Петров в 1802 году открыл электрическую дугу. Приоритет В. В. Петрова в открытии электрической дуги получил всеобщее признание только в наше время.

В 1833 году профессор Петербургского университета Э. Х. Ленц блестяще обобщил опыты Фарадея по электромагнитной индукции, доказав принцип обратимости электрических и магнитных явлений (1838 год), что сыграло в дальнейшем большую роль в разработке теории электрических машин. В 1844 году Э. Х. Ленц установил количественные соотношения, возникающие при нагревании проводника электрическим током (закон Джоуля — Ленца).

В 1838 году член Петербургской Академии наук Б. С. Якоби создал первый в мире электрический двигатель, имевший практическое значение. Двигатель питался от батареи гальванических элементов. В том же году Якоби открыл явление гальванопластики, а в 1850 году изобрел первый телеграфный буквопечатающий аппарат, опередив в этом на пять лет англичанина Юза.

Русский ученый А. Н. Лодыгин в 1873 году изобрел электрическую лампу и провел первые опытные работы по освещению этими лампами улиц Петербурга.

В 1876 году другой русский ученый П. Н. Яблочков изобрел электрическую свечу, в которой применил электрическую дугу, открытую В. В. Петровым. До второй половины 80-х годов свеча Яблочкова широко применялась во всех странах мира и только позже уступила место электрической лампе Лодыгина. П. Н. Яблочкову принадлежит также приоритет в создании трансформатора.

Исключительно большое значение для развития техники

имело изобретение электрической дуговой сварки и резки металлов, сделанное русскими учеными Н. Г. Славяновым и Н. Н. Бенардосом в 1886—1890 годах. Это изобретение стало быстро внедряться в практику и в настоящее время широко применяется в промышленности.

Большой вклад в развитие электротехники внес русский инженер М. О. Доливо-Добровольский, который в 1889 году изобрел трехфазный асинхронный двигатель. Этот двигатель, обладая рядом преимуществ перед другими электрическими двигателями, до сих пор находит широкое применение в промышленности. В 1891 году Доливо-Добровольский впервые в мире осуществил передачу электрической энергии на расстояние 175 км, применив для этого высокое напряжение трехфазного тока. Все элементы этой передачи — генератор и трансформаторы — были также разработаны им.

Венцом изобретений и открытий в области электротехники в XIX веке было изобретение беспроводного телеграфа (радиотелеграфа) нашим соотечественником А. С. Поповым. 25 апреля 1895 года на заседании Русского физико-химического общества А. С. Попов продемонстрировал первый в мире радиоприемник («грозоотметчик»). Через год А. С. Попов осуществил передачу слов по беспроводному телеграфу на расстояние 250 м, пользуясь азбукой Морзе. Это русское изобретение, доставившее неувядаемую славу его творцу А. С. Попову и русской науке, не встретило поддержки со стороны царского правительства и получило свое признание только в результате упорной и самоотверженной борьбы самого изобретателя.

Таковы заслуги русских ученых, которые, используя достижения мировой науки в области электротехники, ценой больших жертв и лишений в условиях царской России двигали эту науку вперед.

Великая Октябрьская социалистическая революция, осуществив глубочайший социально-экономический переворот, создала все условия для мощного развития производительных сил в нашей стране, для бурного роста науки, культуры и техники.

В первые же годы Советской власти Советское правительство и Коммунистическая партия обратили особое внимание на важность проблемы электрификации страны. По указанию В. И. Ленина в 1920 году была создана Государственная комиссия по электрификации России, которая разработала перспективный план электрификации нашей страны — план ГОЭЛРО.

Уже к концу 1935 года план ГОЭЛРО был перевыполнен в два с половиной раза. К этому времени в СССР были сооружены мощные гидроэлектрические станции на Волхове, Свири, Днепре и ряд тепловых электрических станций

большой мощности, например Шатурская, Каширская, Зуевская и др.

Густая сеть линий электропередач высокого напряжения покрыла к этому времени все промышленные районы нашей страны. С каждым днем все глубже и глубже внедрялась электрическая энергия во все отрасли бурно развивающейся социалистической промышленности, сельского хозяйства и быта. Потребление электрической энергии, например, в 1958 году составило 233 млрд. киловатт-часов, т. е. оно возросло в 120 раз по сравнению с 1913 годом.

Советские электротехники совместно со всеми учеными нашей страны, учитывая достижения мировой науки, успешно разрешали и разрешают почетную задачу дальнейшего развития передовой науки и техники.

Большую роль в успешном осуществлении плана электрификации нашей родины сыграли работы советских ученых Г. М. Кржижановского, М. А. Шателена, Р. Э. Классона, Л. Б. Красина, Т. Ф. Макарьева, Б. Е. Веденеева, Г. О. Графтио, К. А. Круга, С. И. Курбатова, В. Ф. Миткевича, К. И. Шенфера и др.

Советским ученым принадлежат также многочисленные открытия и изобретения в области электротехники, имеющие большое теоретическое и практическое значение.

Выдающийся советский ученый В. П. Вологдин создал мощные ртутные выпрямители и разработал способ поверхностной закалки стальных изделий токами высокой частоты.

Всем известны в настоящее время лампы дневного света, которые были созданы на основе теоретических исследований академика С. И. Вавилова.

Выполняя указания Ленина о создании материальной базы коммунизма, XXI съезд КПСС наметил новый грандиозный план дальнейшей электрификации нашей страны.

В соответствии с утвержденными XXI съездом контрольными цифрами развития народного хозяйства СССР на 1959—1965 годы выработка электроэнергии в стране в 1965 году должна увеличиться до 500—520 миллиардов киловатт-часов, т. е. в 2,1—2,2 раза по сравнению с 1958 годом. К концу этого же года установленная мощность электростанций увеличится более чем в 2 раза.

«Предстоящее семилетие явится решающим этапом в осуществлении идеи Ленина о сплошной электрификации страны», — так записано в решениях XXI съезда. В целях более быстрых темпов развития энергетики страны при меньших капитальных затратах в качестве главного направления в развитии электроэнергетики СССР предусматривается преимущественное строительство тепловых электростанций на дешевых углях, природном газе и мазуте.

Наряду с вводом в действие мощных тепловых электростанций намечено завершить строительство Сталинградской, Братской, Кременчугской, Воткинской, Бухтарминской и ряда других гидроэлектростанций.

27 июня 1954 года в нашей стране начала работать первая в мире атомная электростанция мощностью 5000 киловатт. В 1959—1965 годах намечено ввести в строй ряд атомных электростанций с различными типами реакторов.

За годы семилетки будут электрифицированы железные дороги протяженностью примерно 20 тысяч километров, а также все совхозы, ремонтно-технические станции, колхозы и рабочие поселки.

Будут созданы единые энергетические системы Европейской части СССР и Центральной Сибири, а также объединенные энергетические системы в районах Северо-Запада и Запада, Закавказья, Казахстана и Средней Азии.

В решениях июньского Пленума ЦК КПСС указано, что «борьба за технический прогресс в народном хозяйстве — решающее условие успешного выполнения семилетнего плана». Широкое использование электрической энергии в черной и цветной металлургии, в химической, нефтяной и угольной промышленности, в машиностроении, в строительстве, на транспорте — одно из главнейших условий технического прогресса нашего народного хозяйства.

Великая Октябрьская социалистическая революция открыла широчайшие просторы для творчества ученых в нашей стране, для плодотворного содружества науки и практики. Используя и развивая наследие русских ученых и изобретателей, а также достижения мировой науки и техники, советские электротехники создают новые замечательные электротехнические сооружения, внося этим свой вклад в общенародное дело осуществления плана преобразования природы, в дело построения коммунистического общества.

ГЛАВА I

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ВЕЩЕСТВА

Веществом в физике называется все то, из чего состоят разнообразные тела, образующие природу. Существует сравнительно небольшое количество химических элементов, из которых образуются все разнообразные вещества.

Под химическим элементом понимается определенный вид атомов, обладающих одинаковыми химическими свойствами. Каждому химическому элементу присвоено одноименное название с тем веществом, которое он образует (например, химический элемент железо, химический элемент медь).

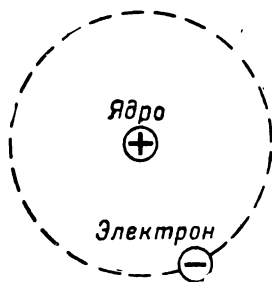


Рис. 1

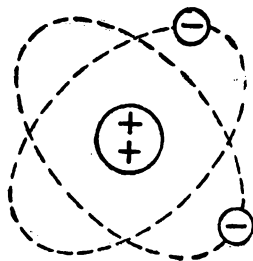


Рис. 2

Простейшим по своему строению является атом химического элемента водорода. Он состоит из двух мельчайших частиц: протона, представляющего собой атомное ядро, и электрона, который движется вокруг этого ядра по некоторой орбите (рис. 1). Протон содержит в себе минимальное количество положительного электричества, а электрон — столько же отрицательного электричества. Эти количества электричества в электроне и протоне называют также их электрическими зарядами, а сами частицы — электрически заряженными частицами.

Электрические заряды одного и того же знака, как известно, отталкиваются, а электрические заряды противоположных знаков притягиваются.

Наличие электрических сил притяжения между разнородными зарядами вынуждает электрон двигаться с большой скоростью по орбите, чтобы за счет возникающей центробежной силы уравновесить силу своего притяжения к положительно заряженному протону.

Атомы других химических элементов имеют более сложную структуру. В 1932 году советским физиком Д. Д. Иваненко впервые было высказано предположение о том, что в ядра атомов всех химических элементов (за исключением водорода), помимо протонов, входят еще и нейтроны — электрически незаряженные частицы, у которых масса несколько больше, чем масса протонов. Предположение Д. Д. Иваненко впоследствии подтвердилось. Количество нейтронов у различных атомов различно. У некоторых элементов, более легких по весу, нейтроны входят в ядро в равном количестве с протонами, у некоторых же, более тяжелых, их больше, чем протонов.

Для примера рассмотрим структуру атома гелия. Атом этого химического элемента (газа) состоит из ядра, включающего в себя два протона и два нейтрона, и двух электронов, движущихся вокруг ядра по самостоятельным орбитам (рис. 2).

Атомы всех химических элементов устроены аналогично, разница лишь в количестве и расположении входящих в них частиц, т. е. протонов, электронов и нейтронов.

У всех без исключения атомов ядра находятся в центре и заряжены только положительно, а электроны расположены на орбитах, окружающих ядро, и заряжены отрицательно. Общее количество отрицательного электричества электронов, входящих в атом, равно общему количеству положительного электричества протонов, содержащихся в ядре. Следовательно, атом любого вещества представляет собой в целом электрически нейтральную систему, т. е. не проявляет себя заряженным положительно или отрицательно по отношению к другим заряженным частицам. Разноименные электричества как бы взаимно нейтрализуют свои проявления вне атома.

Химические свойства любого элемента определяются исключительно структурой его атомного ядра.

В настоящее время установлено, что в природе существует свыше 100 (вместе с заурановыми) химических элементов. Некоторые из них открыты сравнительно недавно, причем открытие их было предсказано нашим гениальным соотечественником Д. И. Менделеевым в его знаменитой периодической системе элементов, созданной им в 1869 году. Достижения современной физики в области изучения атомного ядра позволяют получать искусственным путем ряд

новых, не встречающихся в природе элементов (заурановые элементы).

Из сказанного можно сделать вывод, что основными частицами, образующими все вещества в природе, являются **электрон, протон и нейтрон**. Считать, однако, что эти частицы представляют собой предел делимости вещества, будет неверно. В 1932 году был открыт позитрон, т. е. частица, имеющая массу и размеры такие же, как и у электрона, но заряженная положительно. Несколько позже была открыта электрически нейтральная частица — нейтрино — с настолько малой массой, что ее до сих пор пока еще не удалось измерить.

Таковы краткие, далеко не полные сведения о строении вещества.

ГЛАВА II

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ И ИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

§ 1. СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ

Из всех частиц, образующих вещество, нас прежде всего интересуют электрически заряженные частицы и в первую очередь электроны. Исследования показывают, что электроны всех без исключения атомов совершенно одинаковы.

Величина силы взаимодействия между электроном и ядром определяется общей формулой (закон Кулона)

$$F = \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1)$$

где q_1 и q_2 — количества электричества в заряженных телах;
 r — расстояние между телами.

Формула справедлива лишь в том случае, когда расстояние между телами намного больше их размеров. Линия действия силы направлена по прямой, соединяющей тела (рис. 3). Из формулы следует, что чем больше расстояние между электроном и ядром, тем меньше сила притяжения между ними.

В сложных по строению атомах электроны расположены на нескольких орбитах разного диаметра, поэтому и силы притяжения их к ядру различны. Электроны, находящиеся на ближайших орбитах, связаны с ядром атома сильнее, а электроны, находящиеся на дальних орбитах, — слабее.

В металлах и их сплавах отдельные электроны, находящиеся на дальних орбитах, настолько удалены от ядер, что при своем круговом движении могут временно сходить со своих орбит и, потеряв связь с ядром, свободно перемещаться в межуатомном пространстве. Такие электроны принято называть свободными и в отличие от связанных электронов,

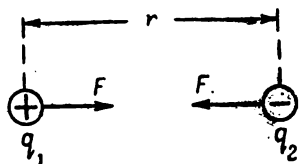


Рис. 3

которые расположены на менее удаленных орбитах и надежно удерживаются на них ядром.

Свободные электроны движутся в междоатомном пространстве беспорядочно и в силу этого временами опять попадают на орбиты к своим или к другим атомам, также временно лишившимся электронов. Процесс перехода электронов на орбиты или в свободное состояние продолжается непрерывно, однако в любой момент времени в теле имеется определенное количество свободных электронов. Это количество определяется структурой атомов, поэтому различно в разных металлах и сплавах. В чистых металлах, особенно в серебре, свободных электронов очень много, в сплавах их значительно меньше.

Каждый свободный электрон, покидая атом, превращает его в положительно заряженный; следовательно, общее количество свободных электронов в теле всегда равно общему количеству положительно заряженных атомов в нем. Положительно заряженные атомы продолжают удерживать в теле силами притяжения свободные электроны, поэтому для их удаления за пределы тела необходимо затратить некоторую энергию.

§ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ НЕЙТРАЛЬНОСТЬ И ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ

Любое тело считается электрически нейтральным, если положительное и отрицательное электричество находятся в нем в равных количествах. В природе все тела обычно находятся в электрически нейтральном состоянии. При наличии свободных электронов электрическая нейтральность тела также сохраняется, так как свободные электроны продолжают оставаться в теле. Всякое нарушение количественного равенства обоих видов электричества в теле переводит его в электрически заряженное состояние. Наэлектризовать тело — значит зарядить его тем или другим видом электричества.

Так как положительное электричество заключается в протонах и надежно удерживается ядрами атомов, то нарушить количественное равенство обоих видов электричества в теле, а стало быть, и его электрическую нейтральность можно лишь изменением отрицательного электричества, заключенного в электронах. Если, например, нужно зарядить тело положительным электричеством, то из него удаляют некоторое количество электронов (свободных или связанных). В теле остается такое же количество нескомпенсированных протонов, которые и заряжают тело положительно. Наоборот, когда тело необходимо зарядить отрицательно, то ему добавляют некоторое количество электронов. Эти электроны не компенсируются имеющимися в теле протонами и поэтому заряжают тело отрицательно.

Количество нескомпенсированного электричества (того или другого знака), которое остается в теле в результате электризации, называется его электрическим зарядом, а сам процесс разделения двух видов электричества называется электризацией тела.

Практически электризация тел может быть осуществлена различными способами. Всем известен способ электризации тел путем их трения друг о друга. Если, например, стеклянную палочку потереть шелком, то она потеряет часть своих электронов и зарядится положительно, шелк же за счет электронов стеклянной палочки зарядится отрицательно. Явление электризации тел имеет огромное практическое значение.

Чтобы понять, каким образом электризация тел позволяет использовать электрическую энергию, а также ответить на вопрос, что такое электрическая энергия и как она возникает, необходимо явление электризации тел изучить более подробно.

§ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ТЕЛ

Предположим, что мы имеем возможность переносить свободные электроны с шарика *В* на шарик *А* (рис. 4) и таким образом электризовать их. При переносе первого же электрона мы столкнемся с противодействием силы притяжения положительно заряженного атома шарика *В*. Для преодоления этой силы нам придется применить внешнюю силу и, следовательно, израсходовать некоторую энергию.

Перенос следующего электрона потребует уже большей энергии, так как он будет притягиваться к шарiku *В* двумя положительно заряженными атомами и отталкиваться от шарика *А* первым, уже перенесенным электроном. Для третьего электрона потребуются еще больше энергии и т. д.

Таким образом, электризация тел сопровождается возникновением электрических сил и затратой энергии внешних сил.

В результате электризации шарик *В* зарядится положительно, а шарик *А* — отрицательно.

Теперь рассмотрим, какие изменения вызвала электризация шариков в окружающем их пространстве.

Согласно закону Кулона, выраженному формулой (1), два заряженных тела могут взаимодействовать на любом расстоянии. Следовательно, если поместить электрон в любую точку пространства относительно заряженных шариков, то он везде будет испытывать на себе действие электрических сил.

Каким же образом происходит этот процесс взаимодействия наэлектризованных тел?

Оказывается, что действие одного заряженного тела на другое передается через материальную среду, которая приходит в возбуждение под действием электрических зарядов,

заключенных в телах. Эту возбужденную материальную среду, окружающую заряженные тела, называют электрическим полем зарядов.

Ознакомимся подробнее с электрическим полем заряженных тел. Представим себе, что один из электронов взят с шарика A и помещен хотя бы в точку C в плоскости нашего чертежа (рис. 5). На этот электрон будут действовать две силы, F_1 и F_2 , направленные по линиям, соединяющим электрон

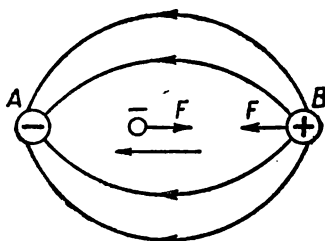


Рис. 4

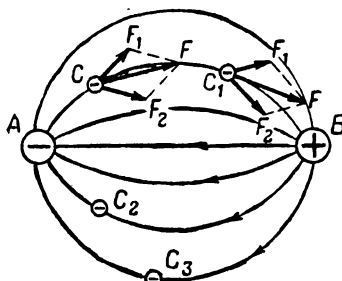


Рис. 5

с геометрическими центрами шариков. Первая из сил будет отталкивать электрон от шарика A , а вторая — притягивать его к шарика B . Величина сил по закону Кулона определится формулами

$$F_1 = \frac{qq_0}{r_1^2} \quad (2)$$

и

$$F_2 = \frac{qq_0}{r_2^2}, \quad (3)$$

где q — величина электрического заряда каждого шарика;

q_0 — величина электрического заряда электрона;

r_1 и r_2 — расстояния между электроном и шариками.

В результате сложения этих двух сил получим результирующую силу F , которая и будет стремиться перемещать электрон из точки C к шарика B . Если электрону предоставить свободу, то он станет двигаться в сторону шарика B и при своем движении опишет некоторую кривую (траекторию). В каждой точке этой кривой результирующая сила F будет направлена по касательной, а величина ее в различных точках кривой будет различна вследствие изменения величины и направления сил F_1 и F_2 при движении электрона (положение в точке C_1).

Если электрон последовательно помещать в другие точки поля (C_2 , C_3 и т. д.), то он будет совершать движение по другим кривым и лишь в одном случае будет двигаться по прямой линии, соединяющей центры шариков.

Положительно заряженная частица, помещенная в поле (например, протон водорода), будет двигаться по тем же кривым, но в обратном направлении.

Кривые (рис. 5), по которым перемещаются в электрическом поле заряженные частицы, условились называть электрическими силовыми линиями. Силовыми линиями для большей наглядности принято изображать электрические поля на чертежах. По густоте силовых линий судят о величине результирующей силы. Там, где сила больше, линии проводят ближе одну к другой (гуще) и, наоборот, там, где сила меньше, линии проводят реже.

За направление силовых линий условились принимать направление от положительно заряженного тела к отрицательному, т. е. такое, в кото-

ром должна двигаться положительно заряженная частица. Силовые линии поля всегда перпендикулярны к поверхностям заряженных тел и заканчиваются на этих поверхностях.

Опытом установлено, что если полый проводник, имеющий, например, форму шара (рис. 6), поместить в электрическое поле, то внутри шара поле как бы уничтожается. Это свойство полых проводников широко используется для экранирования (защиты) некоторых приборов от действия на них внешних электрических полей. Экраны изготовляют обычно в виде тонкостенных металлических цилиндров (алюминиевых, латунных, медных), размеры которых позволяют разместить в них защищаемые приборы.

Отсутствие электрического поля внутри полых проводников объясняется явлением электростатической индукции (возбуждением электрических зарядов в проводниках на расстоянии). Сущность явления заключается в следующем. Под действием сил внешнего электрического поля заряженных тел A и B свободные электроны в полом проводнике (рис. 6) начинают смещаться в сторону положительно заряженного тела A . В результате правая сторона проводника начинает заряжаться отрицательно (из-за избытка электронов), а левая — положительно (из-за недостатка электронов) и в проводнике возникает собственное электрическое поле. Как видно из рис. 6 (см. пунктирные линии), это поле противоположно по направлению внешнему полю, поэтому смещение электронов в проводнике прекращается, когда силы собственного электрического поля проводника становятся равными силам

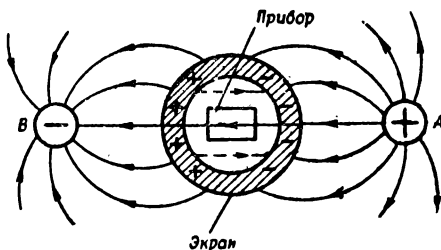


Рис. 6

внешнего поля. Так как собственное и внешнее электрические поля направлены в противоположные стороны, то внутри проводника они как бы взаимно уничтожаются.

§ 4. ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ

Известно, что при подъеме какого-либо тела на некоторую высоту расходуемая нами энергия переходит в потенциальную энергию тела. Чтобы убедиться в этом, достаточно поднятому телу предоставить свободу. Тело начнет двигаться к земле под действием силы притяжения, а запасенную энергию возвратит на совершение той или иной работы.

Применяя эту аналогию для случая переноса электрических зарядов, можно предположить, что энергия, расходуемая внешними силами на перемещение электронов с шарика *B* на шарик *A*, также превращается в потенциальную энергию электронов.

Следовательно, если электронам предоставить возможность, то они станут двигаться обратно к шарiku *B* под действием электрических сил, а запасенную энергию возвращать на совершение работы. Опыт и практика подтверждают такое предположение.

Потенциальную энергию электронов можно отнести и к электрическому полю и считать, что именно поле запасает энергию внешних сил при электризации тел. Эта энергия внешних сил, накапливаемая электрическим полем, и есть электрическая энергия.

Вызывая движение электронов действием своих сил, электрическое поле одновременно возвращает и электрическую энергию, которая может быть использована на совершение той или иной работы.

Таким образом, рассмотрев явление электризации тел, мы можем сделать следующие выводы: электризация тел всегда сопровождается расходом энергии внешних сил на преодоление электрических сил взаимодействия между разноименными зарядами; эта энергия накапливается в электрическом поле наэлектризованных тел и может быть в дальнейшем использована на практике в виде электрической энергии.

На принципе электризации тел работают все существующие в настоящее время источники электрической энергии: гальванические элементы, аккумуляторы, электрические машины и т. п. Разница между ними лишь в том, что в них используются различные способы электризации.

Электризация шариков позволяет получать электрическую энергию не непрерывно, а в виде кратковременных импульсов (порциями). Объясняется это тем, что с переходом всех электронов обратно на шарик *B* оба шарика опять становятся

нейтральными и их электрическое поле исчезает. Для получения нового импульса электрической энергии нужно снова наэлектризовать шарики, чтобы вызвать появление электрического поля, и т. д.

Таким образом, наличие электрического поля является тем необходимым условием, которое дает возможность превращать в электрическую энергию другие виды энергии.

Для непрерывного получения электрической энергии необходимо все время поддерживать электрическое поле путем непрерывной электризации тел (рис. 7), т. е. на смену каждому электрону, уходящему с шарика *A* под действием электрических сил (участок *ACB*), подавать на этот шарик при помощи внешних сил новый электрон с шарика *B* (участок *BDA*). На практике так и поступают, применяя для непрерывной электризации двух тел тот или иной источник электрической энергии.

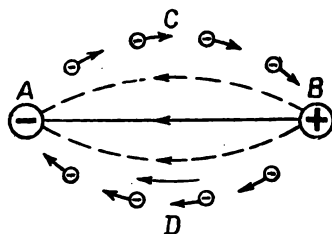


Рис. 7

Всякое движение электрических зарядов называют электрическим током, поэтому следует считать, что непрерывная электризация тел сопровождается током, поскольку при ней происходит непрерывное движение электронов по некоторому замкнутому контуру *ACBDA* (рис. 7).

§ 5. МЕТОД ПОДСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

До сих пор мы считали, что при электризации тел в их электрическом поле перемещаются отдельные электроны, и это было правильно, но заряд электрона чрезвычайно мал, и им пользоваться при вычислениях неудобно. Поэтому условились все расчеты вести в отношении единичного заряда, т. е. такого заряда, который в данной системе единиц принят за единицу измерения количества электричества. Такая единица называется кулоном (κ , С), в ней содержится $6,29 \cdot 10^{18}$ зарядов электронов¹.

Под количеством электричества (положительного или отрицательного) следует понимать некоторую его часть, которая заключается в элементарных заряженных частицах (электронах или протонах) в виде мельчайших зарядов.

Пусть при непрерывной электризации шариков в их электрическом поле по замкнутому контуру *ACBDA* (рис. 7) перемещаются единичные электрические заряды.

¹ С новой системой единиц измерения, принятой в СССР, ознакомимся подробнее в гл. IV.

Как же вычислить электрическую энергию, которую отдают эти заряды на участке ACB за некоторое время?

При решении этой задачи необходимо учитывать следующее:

1. Все единичные заряды по величине одинаковы и перемещаются внешними силами по одному и тому же участку ADB электрического поля.

2. Само поле при непрерывной электризации шариков не изменяет величины своих электрических сил, действующих на единичный заряд в отдельных точках участка ADB , поэтому при перемещении каждого единичного заряда с шарика B на шарик A внешние силы расходуют одинаковую энергию. Но если энергия внешних сил для перемещения каждого единичного заряда одинакова, то и электрическая энергия, отдаваемая каждым зарядом, также должна быть одинакова и равна энергии внешних сил (по закону сохранения энергии).

Следовательно, для вычисления электрической энергии, отдаваемой зарядами на участке ACB за некоторое время, достаточно вычислить энергию, отдаваемую одним единичным зарядом, и полученный результат умножить на число всех зарядов, которые пройдут по участку ACB за то же время.

К этому принципиально и сводится подсчет электрической энергии.

§ 6. НАПРЯЖЕННОСТЬ И ПОТЕНЦИАЛ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

При подсчете величины электрической энергии на практике пользуются двумя очень удобными понятиями — «напряженность» и «потенциал» электрического поля.

Напряженностью поля в любой его точке условились называть результирующую электрическую силу, которая действует на единичный заряд, находящийся в этой точке¹. Напряженность характеризует силовые свойства электрического поля и обозначается буквой E .

Для определения напряженности в рассматриваемой точке поля (например, в точке C) необходимо геометрически сложить силы F_1 и F_2 (рис. 8), действующие на единичный заряд в этой точке. Величина сил определяется формулами

$$F_1 = \frac{qq_0}{r_1^2}$$

и

$$F_2 = \frac{qq_0}{r_2^2},$$

где q — величина электрических зарядов шариков;

q_0 — величина единичного заряда;

r_1 и r_2 — расстояния от точки поля до центров шариков.

¹ Такое название не совсем удачно, так как понятие «напряженность» скорее говорит о состоянии того или иного явления, а не о силе.

Из формул видно, что силы F_1 и F_2 пропорциональны электрическим зарядам шариков, так как величины q_0 , r_1 и r_2 для данной точки поля постоянны.

Благодаря пропорциональной зависимости между силами и электрическими зарядами шариков напряженность в любой точке поля также получается пропорциональной этим зарядам. На рис. 8 показано, что если силы F_1 и F_2 увеличить в n раз, то в n раз увеличится и диагональ нового параллелограмма, представляющая собой результирующую силу F_n (напряженность поля).

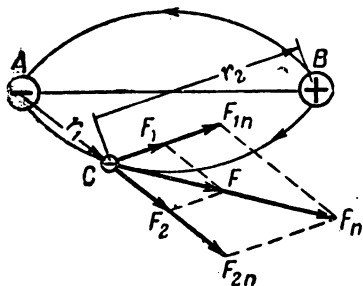


Рис. 8

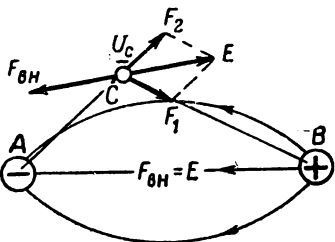


Рис. 9

Потенциалом поля в какой-либо его точке называется энергия, которую поле способно сообщить единичному заряду, находящемуся в этой точке.

При вычислении электрической энергии нас интересуют потенциалы тех точек, через которые проходит единичный заряд под действием сил электрического поля на участке ACB (рис. 7).

Численно потенциал всегда равен энергии, которую должна израсходовать внешняя сила $F_{вн}$ (совершая за счет этой энергии равноценную работу), чтобы переместить единичный заряд с шарика B в точку, где рассматривается потенциал, например в точку C (рис. 9). Конечно, если заряду в точке C предоставить свободу, то он станет двигаться обратно (в сторону шарика B) под действием напряженности (E) электрического поля, а энергия, израсходованная внешней силой и запасенная полем, будет возвращаться в виде электрической энергии.

Электрический заряд, находящийся в какой-либо точке поля, аналогичен телу, поднятому над землей на некоторую высоту, а потенциал поля аналогичен потенциальной энергии силового поля земли.

По закону сохранения энергии потенциальная энергия поля всегда равна энергии внешних сил. Поэтому и потенциал электрического поля в любой его точке численно равен энергии, которую должны израсходовать внешние силы,

чтобы переместить единичный заряд с шарика B в рассматриваемую точку.

Потенциал характеризует энергетические свойства поля и обозначается буквой U с индексом, относящимся к рассматриваемой точке.

§ 7. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ

При перемещении единичного заряда внешняя сила должна быть равна по величине напряженности поля (рис. 9), действующей на заряд, но обратна ей по направлению. Поэтому для вычисления потенциалов в отдельных точках поля можно пользоваться формулой

$$U = El, \quad (4)$$

где E — напряженность поля в отдельных точках пути перемещения единичного заряда;

l — расстояние (путь) от рассматриваемой точки до шарика B .

В подробных курсах электротехники доказывается, что величина работы, совершаемой в поле внешними или электрическими силами при перемещении заряда, не зависит от формы пути, а зависит лишь от расстояния (по прямой) между рассматриваемой точкой и шариком B .

Таким же свойством обладает и силовое поле земли. Поэтому энергия, необходимая для поднятия тела, получается всегда одинаковой, будем ли мы поднимать тело на заданную высоту прямо вверх, перпендикулярно к поверхности земли, или же по иному пути.

Нужно отметить, что вычисление потенциалов по формуле $U = El$ имеет все же некоторые трудности. Дело в том, что по этой формуле работа вычисляется просто лишь в том случае, когда путь представляет собой прямую линию, а сила на протяжении всего пути остается неизменной.

Путь всегда можно брать прямолинейным (на основе отмеченного выше свойства поля), но напряженность, как результирующая электрическая сила, для различных точек пути получается разной по величине (§ 3), поэтому здесь нельзя ограничиться простым перемножением напряженности на длину пути.

При вычислении потенциалов путь разбивают на малые участки Δl и для каждого участка берут среднее значение напряженности, т. е. среднее арифметическое между значениями напряженности в начале и конце участка. Это значение для данного участка считают постоянным. После этого вычисляют работу силы (т. е. средней напряженности) для каждого участка по формуле

$$\Delta U = E_{\text{ср}} \Delta l$$

и полученные результаты складывают. Величина потенциала при этом получается приближенной.

Нетрудно понять, что чем дальше от шарика *B* находится рассматриваемая точка поля, тем больший в ней получается и потенциал, так как внешней силе приходится расходовать больше энергии на перемещение единичного заряда (длиннее путь). Очевидно, наибольший потенциал будет на самом шарике *A*, на шарике же *B*, наоборот, потенциал будет равен нулю (нулевой потенциал).

§ 8. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ПОТЕНЦИАЛОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ЗАРЯДАМИ НАЭЛЕКТРИЗОВАННЫХ ТЕЛ

В § 6 было показано, что напряженность электрического поля во всех его точках пропорциональна величине электрических зарядов. Известно также, что числовые значения потенциалов определяются формулой $U = El$.

Так как в этой формуле расстояние *l* от рассматриваемой точки до шарика остается неизменным, то можно сказать, что потенциал в любой точке зависит только от напряженности поля и, следовательно, пропорционален ей. Но если потенциал пропорционален напряженности поля, которая в свою очередь пропорциональна электрическим зарядам шариков, то и потенциал также пропорционален этим зарядам.

При непрерывной электризации тел их заряды по величине остаются неизменными, поэтому и потенциалы поля во всех точках остаются постоянными. Для того чтобы изменить потенциалы точек поля в несколько раз, необходимо изменить электрические заряды тел во столько же раз. Если, например, прекратить движение единичных зарядов под действием электрических сил на участке *ACB* (рис. 7) и продолжать перемещение зарядов внешними силами на участке *ADB*, то заряды на шариках возрастут, и это вызовет соответствующее увеличение потенциалов во всех точках поля.

Конечные значения потенциалов определяются энергией, которую израсходуют внешние силы на перемещение последнего единичного заряда с шарика *B* на шарик *A*. Вполне естественно, что для повышения потенциалов в точках поля потребуется увеличить и внешние силы для преодоления все возрастающих сил электрического поля (т. е. напряженности).

§ 9. ФОРМУЛЫ ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Потенциал — очень удобная величина для определения электрической энергии. Если известен потенциал поля в какой-либо его точке, например потенциал в точке *C* (рис. 9),

то, следовательно, известна и величина электрической энергии, которую может отдать единичный заряд на участке CB .

Зная потенциал шарика A , можно вычислить величину электрической энергии, отдаваемой всеми единичными зарядами на участке ACB за некоторое время t . Для этого можно воспользоваться формулой

$$W = QU_A, \quad (5)$$

где U_A — потенциал шарика A ;

Q — число единичных зарядов, прошедших по участку ACB за данное время.

С физической точки зрения число единичных зарядов Q определяет собой количество электричества, прошедшего по участку ACB за время t . В дальнейшем под количеством электричества, прошедшего за некоторое время по участку ACB , мы и будем понимать все единичные заряды, которые прошли по участку за это время.

Теперь установим единицы для измерения энергии, потенциала и напряженности электрического поля.

В принятой у нас системе единиц электрическая энергия измеряется в джоулях (*дж*, J). Джоуль фактически является единицей измерения работы, но так как работа и энергия равноценны (работа есть лишь внешнее проявление энергии тела), то это позволяет измерять энергию теми же единицами, что и работу.

В практических условиях работа служит наиболее удобным средством для оценки энергии. Энергию можно оценивать и по теплу, выделившемуся при выполнении работы, но это менее удобно.

Единица измерения работы определяется из формулы

$$A = Fl.$$

Принимая в этой формуле $F = 1$ ньютону и $l = 1$ м, находим единицу работы — ньютонметр. Эта единица по новой системе единиц называется также джоулем.

Таким образом, джоуль — это работа, которую совершает сила в один ньютон при перемещении точки ее приложения на один метр по направлению действия этой силы.

Ньютон (n , n) служит единицей измерения силы. Численно ньютон составляет $0,102$ кг, принятого за единицу силы по старой системе единиц. Единица измерения потенциала устанавливается на основе формулы

$$W = QU.$$

Из этой формулы находим

$$U = \frac{W}{Q}.$$

Полагая в последнем равенстве $W = 1$ джоулю и $Q = 1$ кулону, получим единицу для измерения потенциала, т. е. $\frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}}$.

Эту единицу иначе называют вольт (в, V). С физической точки зрения вольт представляет собой такой потенциал в рассматриваемой точке, при котором внешние силы расходуют один джоуль энергии на перемещение единичного заряда в эту точку.

Единица измерения напряженности получается из формулы

$$U = El,$$

откуда

$$E = \frac{U}{l} \frac{\text{вольт}}{\text{метр}}.$$

Пусть, например, напряженность в данной точке поля составляет $10 \frac{\text{в}}{\text{м}}$. Это означает, что если бы напряженность оставалась такой и для других точек, то внешним силам пришлось бы расходовать энергию в 10 в на каждый метр пути перемещения единичного заряда.

Внешнее несоответствие единицы измерения напряженности $\left(\frac{\text{вольт}}{\text{метр}}\right)$ ее физическому смыслу (сила электрического поля) объясняется тем, что в вольт в скрытом виде входит истинная единица измерения потенциалов $\left(\frac{\text{дж}}{\text{к}}\right)$, а джоуль означает единицу работы, т. е. ньютонметр (н·м).

Подставив вместо вольт и джоуля подлинные единицы измерения, получим

$$\frac{\text{в}}{\text{м}} = \frac{\text{н} \cdot \text{м}}{\text{к} \cdot \text{м}} = \frac{\text{ньютон}}{\text{кулон}}.$$

Это и будет истинная единица измерения напряженности. Она показывает, что напряженность есть сила электрического поля, отнесенная к единичному заряду, т. е. действующая на один кулон электричества.

Итак, мы установили, как подсчитать электрическую энергию на участке ACB при непрерывной электризации шариков. Однако на практике чаще всего приходится вычислять энергию не на всем участке, а лишь на некоторой его части, например между точками a и b (рис. 10). В этом случае прибегают к разности потенциалов.

Так, например, если известны потенциалы в точках a и b , т. е. U_a и U_b , то разность между ними $U_a - U_b$ и будет

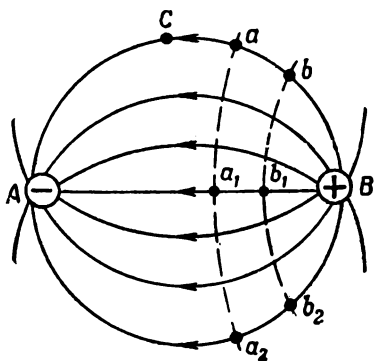


Рис. 10

равна энергии, которую должны израсходовать внешние силы, чтобы переместить единичный заряд из точки b в точку a против сил электрического поля. В действительности заряд на участке ab , конечно, движется в обратном направлении и отдает электрическую энергию, равную по величине разности потенциалов $U_a - U_b$.

Зная разность потенциалов на концах участка ab , мы можем определить на этом участке полную электрическую энергию,

т. е. энергию, отдаваемую всеми единичными зарядами за некоторое время, по формуле

$$W = Q(U_a - U_b) \text{ джоуль,} \quad (6)$$

где Q — количество электричества, прошедшего по участку ab за данное время.

Разность потенциалов принято называть также напряжением или падением напряжения на участке и обозначать буквой U . Поэтому можно написать

$$U = U_a - U_b.$$

Тогда формула (6) примет вид

$$W = QU.$$

Эта формула является общей и позволяет подсчитать величину электрической энергии в любой части участка ACB , а также и на всем участке (рис. 10).

Действительно, разность потенциалов на шариках A и B выражается формулой

$$U = U_A - U_B.$$

Но $U_B = 0$, следовательно, $U = U_A$, т. е. разность потенциалов в этом случае численно равна величине потенциала на шарике A .

Электрическая энергия, отдаваемая всеми единичными зарядами на участке ACB за некоторое время, будет равна

$$W = QU_A.$$

Таким образом, мы пришли к формуле (5), которую получили несколько выше, и это объясняется, конечно, равенством $U = U_A$.

Разность потенциалов на практике измеряется вольтметром.

§ 10. ЭКВИПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

В каждом поле есть бесчисленное количество точек с одинаковыми потенциалами. На рис. 10 показана точка a_2 , которая расположена симметрично относительно точки a , поэтому имеет такой же потенциал, как и эта точка.

Очевидно, таких точек в поле много и все они расположены на одной поверхности. На рис. 10 пересечение этой поверхности с плоскостью чертежа показано пунктирной линией aa_1a_2 . Рядом показано пересечение с плоскостью чертежа другой такой поверхности (линия bb_1b_2), у которой точки также имеют одинаковые потенциалы. Однако эти потенциалы меньше, чем у точек первой поверхности, так как вторая поверхность (линия bb_1b_2) расположена ближе к шару B и внешние силы должны расходовать меньше энергии при перемещении единичного заряда.

Каждую такую поверхность называют **поверхностью одинаковых потенциалов**, или **эквипотенциальной**; любые же линии, взятые на эквипотенциальной поверхности, называют **линиями равного потенциала**. Такими линиями, например, являются пунктирные линии пересечения эквипотенциальных поверхностей с плоскостью чертежа, приведенные на рис. 10. По отношению к линиям равного потенциала силовые линии электрического поля направлены перпендикулярно (в любой точке).

Для двух любых точек эквипотенциальной поверхности (или линии равного потенциала) разность потенциалов всегда равна нулю. Физически это означает, что по эквипотенциальной поверхности единичные заряды не могут перемещаться под действием сил электрического поля (аналогично тому, как поднятое на какую-то высоту тело не может самостоятельно перемещаться в плоскости, параллельной поверхности земли) и, следовательно, не могут отдавать электрической энергии, так как согласно формуле

$$W = Q(U_a - U_{a1}) = 0.$$

§ 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ ТЕЛ

Под емкостью какого-либо сосуда для жидких, газообразных или сыпучих тел понимают его способность вмещать в себя эти тела в определенном объеме или весовом количестве.

Несжимаемые, например жидкие, тела в данный сосуд всегда вмещаются в одном и том же количестве (если пренебречь температурными изменениями). Весовое же количество газообразных тел в сосуде зависит от давления, под которым они находятся. Следовательно, емкостью сосуда для газообразных тел можно считать его способность удерживать

в себе эти тела в количествах, соответствующих нормальному атмосферному давлению.

После рассмотрения приведенных аналогий перейдем к уяснению электрической емкости тел.

При изучении потенциала (§ 8) было установлено, что потенциалы в точках поля и электрические заряды в наэлектризованных телах пропорциональны друг другу, поэтому для определения величины электрического заряда тела можно написать

$$Q = CU, \quad (7)$$

где U — потенциал тела в вольтах;

C — некоторый постоянный коэффициент пропорциональности.

Из приведенной формулы находим

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (8)$$

Коэффициент пропорциональности C и представляет собой величину электрической емкости тела.

Если в формуле (8) положить, что $U = 1$ вольту, то емкости можно дать такое определение: **электрической емкостью тела называется его способность удерживать на себе электрический заряд при потенциале, равном одному вольту.**

Единица измерения емкости тел называется фарадой (ϕ , F). Из формулы (8) следует (если положить $Q = 1$ кулону и $U = 1$ вольту), что фарада — это такая емкость, при которой тело способно удерживать на себе 1 кулон электричества при потенциале в 1 вольт.

Так как фарада очень большая единица, то на практике пользуются миллионными долями фарады — микрофарадами ($мкф$), а также еще более мелкими долями ($1 \cdot 10^{-12}$ фарады) — микромикрофарадами ($мкмкф$), или пикофарадами ($пф$).

Величина электрической емкости тел определяется их наружной поверхностью. Электроны, попавшие на поверхность тела под действием внешних сил, отталкиваются полями собственных электронов данного тела и, не имея возможности проникнуть внутрь тела, остаются на его поверхности. Следовательно, чем больше наружная поверхность тела, тем больший можно сообщить ему заряд при одном и том же потенциале. А раз тело удерживает больший заряд, значит и емкость у него больше.

§ 12. КОНДЕНСАТОР

Для получения сравнительно больших по величине электрических зарядов делают специальные приборы, называемые конденсаторами.

Простейшим конденсатором является плоский конденсатор (рис. 11), состоящий из двух одинаковых металлических пластин, разделенных слоем воздуха или другого вещества, в котором нет свободных электронов. Такие вещества называют диэлектриками или изоляторами.

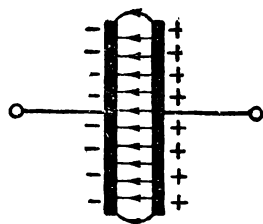


Рис. 11

Особенность плоского конденсатора по сравнению с другими конденсаторами состоит в том, что электрическое поле между его пластинами равномерное, т. е. напряженность такого поля в любой точке одинакова. Равномерное поле изображают одинаковой густотой силовых линий (рис. 11).

Электрические заряды на пластинах конденсатора располагаются только на одной стороне (внутренней) под действием возникающих электрических сил притяжения.

Емкость плоского конденсатора, понимаемая как емкость одной из его пластин (любой), определяется формулой

$$C = \frac{\epsilon S}{d}, \quad (9)$$

где S — поверхность одной стороны пластины в квадратных метрах;

d — расстояние между пластинами в метрах;

ϵ — диэлектрическая проницаемость изолирующего слоя.

Выясним физический смысл формулы. Почему емкость конденсатора пропорциональна одной стороне поверхности пластины, нам уже известно. Чем больше эта поверхность, тем больше на ней можно поместить электронов.

Сравнительно легко объяснить, почему емкость конденсатора обратно пропорциональна расстоянию между пластинами. Чем ближе между собой пластины, тем сильнее проявляется частичная нейтрализация их электрических зарядов, подобно тому как происходит нейтрализация зарядов у электронов и протонов в атоме (гл. I).

В результате частичной нейтрализации величина зарядов на пластинах как бы уменьшается, а это позволяет внешним силам при той же их величине переместить на отрицательно заряженную пластину дополнительные электроны и увеличить ее заряд (заряд увеличится и на положительно заряженной пластине). Но если заряды на пластинах увеличиваются, значит и емкость конденсатора также увеличивается, так как значения потенциалов на пластинах остаются неизменными благодаря неизменной величине внешних сил.

Теперь обратимся к диэлектрической проницаемости и вы-

ясним, что это за величина и почему емкость конденсатора зависит от нее прямо пропорционально.

Опыт показывает, что если одни и те же заряженные тела при неизменном расстоянии между ними помещать в вакууме и в другой какой-либо изолирующей среде, например в воде, то силы взаимодействия между ними будут различны. В воде сила будет в 81 раз меньше, чем в вакууме. Из этого следует сделать вывод, что на величину силы взаимодействия между заряженными телами оказывает влияние и среда, в которой находятся эти тела. Для учета влияния среды и введена величина, которую называют диэлектрической проницаемостью среды.

Так как среда, отличная от вакуума, всегда уменьшает силы взаимодействия между заряженными телами, то в формуле закона Кулона диэлектрическую проницаемость вводят в знаменатель и формула принимает вид

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

Для нас важно выяснить, почему в среде, отличной от вакуума, сила взаимодействия между заряженными телами уменьшается. Оказывается, что в среде под действием электрического поля заряженных тел происходит явление, называемое поляризацией диэлектриков. Явление это заключается в том, что электронные орбиты атомов среды смещаются под действием электрического поля в сторону положительно заряженного тела. Вследствие этого происходит частичная нейтрализация зарядов тел, что приводит как бы к уменьшению зарядов, а значит, и к уменьшению силы взаимодействия между ними.

Поляризацией диэлектриков легко объяснить, почему емкость конденсатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости изолирующего слоя. Чем больше диэлектрическая проницаемость слоя, тем больше смещаются орбиты электронов у атомов этого слоя в сторону положительно заряженной пластины. Но чем меньше расстояние между смещенными электронами и положительно заряженными атомами пластины, тем сильнее нейтрализуются их заряды. Поэтому поляризация в изолирующем слое конденсатора, как и уменьшение расстояния между его пластинами, ведет к частичной нейтрализации электрических зарядов на пластинах и к повышению емкости конденсатора.

Диэлектрическая проницаемость для различных диэлектриков в соответствии с принятой у нас системой единиц измерения может быть представлена как произведение двух сомножителей

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r,$$

где $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \frac{\text{кулон}}{\text{вольт} \cdot \text{метр}}$ — диэлектрическая проницаемость вакуума;

ϵ_r — относительная проницаемость, представляющая собой отвлеченное число, показывающее во сколько раз диэлектрическая проницаемость рассматриваемой среды больше диэлектрической проницаемости вакуума.

В табл. 1 приведены значения относительной проницаемости для некоторых диэлектриков.

Т а б л и ц а 1

Относительная проницаемость диэлектриков

Название диэлектрика	Значение ϵ_r
Вакуум	1,0
Воздух	1,00059
Бумага	3,0—3,5
Эбонит	3,0—3,5
Слюда	4,0—7,5
Целлулоид	4,0—16,0
Вода	81,0

Как следует из таблицы, в воздухе практически не происходит поляризации.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ II

1. От чего зависит величина электрических сил между заряженными телами?
2. Какие электроны называются свободными и какие связанными?
3. В чем заключается электрическая нейтральность тел?
4. В чем заключается физическая сущность электризации тел?
5. Какими явлениями сопровождается электризация тел?
6. Что называется электрическим полем двух заряженных тел?
7. Что такое силовые линии электрического поля и в чем заключается их условность?
8. Что представляет собой электрическая энергия и как она получается?
9. Как производится подсчет электрической энергии, получаемой при непрерывной электризации двух тел?
10. Что такое напряженность и потенциал электрического поля в какой-либо его точке?
11. Какая существует зависимость между потенциалами в точках поля и величиной электрического заряда наэлектризованного тела?

12. Какова формула для подсчета электрической энергии, получаемой при непрерывной электризации тел?

13. Что такое разность потенциалов двух любых точек электрического поля?

14. Что называется эквипотенциальной поверхностью в электрическом поле?

15. Что представляет собой электрическая емкость тела и от чего зависит ее величина?

16. Назовите единицы измерения потенциала и напряженности поля, а также электрической емкости тел.

17. Что такое конденсатор и от чего зависит емкость плоского конденсатора?

Г Л А В А III

ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

§ 13. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ТВЕРДЫХ ПРОВОДНИКАХ

Изучение электрического тока мы начнем с его прохождения в твердых проводниках. Твердыми проводниками называются тела, содержащие в себе свободные электроны. К таким телам относятся все металлы и их сплавы.

На практике электрический ток всегда получается только путем непрерывной электризации тел специальными источниками электрической энергии. Простейшим по своему устройству источником является термоэлемент, поэтому мы и используем его в своих дальнейших рассуждениях.

Термоэлемент состоит из двух разнородных металлических проволок, спаянных вместе одними своими концами. Два других конца не соприкасаются и образуют зажимы, или выводы элемента.

Если взять термоэлемент, состоящий из медной и железной проволок (рис. 12), и подогреть место спая (точка D), то медная проволока зарядится отрицательно, а железная положительно. Появление электрических зарядов на проволоках приведет к созданию электрического поля термоэлемента, а следовательно, и к возникновению некоторой разности потенциалов на его зажимах A и B . При соединении зажимов A и B проводником свободные электроны, имеющиеся в этом проводнике и в проволоках термоэлемента, начнут перемещаться под действием электрического поля и в замкнутом контуре ABD установится электрический ток.

Такое упорядоченное движение свободных электронов в одном направлении называется постоянным электрическим током.

Физические процессы, протекающие в термоэлементе, еще неполностью изучены. Однако установлено, что благодаря теп-

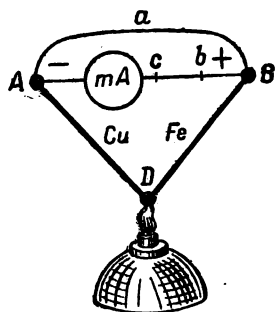


Рис. 12

ловой энергии, подводимой к элементу, в нем возникают дополнительные электрические силы (внешние силы), которые и перемещают электроны с одной проволоки на другую. В термоэлементе тепловая энергия непосредственно превращается в электрическую энергию.

Опытом установлено, что величина разности потенциалов зависит от разности температур в месте спая и на зажимах элемента. В некоторых пределах, различных для разных элементов, сохраняется пропорциональная зависимость между разностью потенциалов и разностью температур в термоэлементе. Это дает возможность измерять высокие температуры с помощью термоэлемента, для чего вольтметр, которым измеряется разность потенциалов у элемента, градуируется прямо в градусах Цельсия. Числовые значения разности потенциалов для некоторых термоэлементов при разности температур 100°C приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2
Разности потенциалов для некоторых
термоэлементов при разности
температур 100°C

Металлы термоэлемента	Разность потенциалов, в
Висмут — сурьма	0,011
Медь — железо	0,001
Константан — железо	0,0053
Медь — константан	0,0047

Для прекращения тока в контуре ABD достаточно отсоединить проводник хотя бы от одного зажима элемента. При этом между отсоединенным концом проводника и свободным зажимом термоэлемента появится слой воздуха, который при нормальных условиях не имеет свободных электронов и, следовательно, не проводит тока.

Все наши рассуждения, которые относились к непрерывной электризации тел, остаются справедливыми и по отношению к электризации, вызываемой термоэлементом.

Зажимы элемента A и B следует рассматривать как наэлектризованные тела. На участке ADB единичные заряды (электроны) перемещаются внешними силами, которые расходуют при этом энергию теплового источника (спиртовой горелки). Эта энергия накапливается электрическим полем элемента. На участке AB , т. е. по соединительной проволоке, единичные заряды движутся под действием сил электрического поля, а запасенную полем энергию возвращают в виде электрической энергии. В нашем случае эта энергия переходит в тепловую и вызывает нагрев проволоки.

Контур, по которому проходит электрический ток, называют замкнутой электрической цепью.

В каждой электрической цепи должен быть источник и приемник электрической энергии. В рассматриваемой цепи таким приемником является соединительная проволока.

Участок *ADB* электрической цепи называют **участком источника** или **внутренним участком цепи**, а участок *AB* — **участком приемника** или **внешним участком цепи** (или просто внешней цепью).

Из рассмотрения работы термоэлемента можно сделать вывод, что постоянный электрический ток в твердых проводниках возможен лишь в замкнутой электрической цепи и при наличии в ней действующего источника электрической энергии, на зажимах которого непрерывно поддерживается разность потенциалов.

§ 14. НЕПРОВОДНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

В отличие от проводников, непроводниками (диэлектриками) называют тела, в которых нет свободных электронов.

Деление тел на проводники и непроводники является условным, так как все тела обладают свободными электронами, только в разном количестве. В непроводниках свободных электронов очень мало, поэтому они тока практически не проводят, хотя их нельзя назвать абсолютными непроводниками.

Роль диэлектриков в практической электротехнике огромна. Без них невозможна была бы электризация тела, а следовательно, и использование электрической энергии. Из диэлектриков изготавливаются разнообразные изолирующие материалы, которые широко используются во всевозможных электрических машинах и приборах, а также в проводах, передающих электрическую энергию от источников тока к приемникам.

Основной характеристикой каждого изолирующего материала является его электрическая прочность, т. е. способность противостоять действию электрических сил поля, сохраняя свои изолирующие свойства.

Если диэлектрик поместить в электрическое поле двух заряженных тел и затем повышать напряженность поля, увеличивая разность потенциалов на телах, то при некоторой разности потенциалов, различной для разных диэлектриков, наступит пробой диэлектрика и он потеряет свои изолирующие свойства.

Причина пробоя объясняется тем, что под действием сил электрического поля связанные электроны вырываются с орбит атомов диэлектрика. В результате этого через диэлектрик начинает идти большой ток, который и разрушает его выделяющейся тепловой энергией (тепловой пробой).

Электрическая прочность изолирующих материалов определяется величиной пробивной разности потенциалов, приходящейся на один сантиметр толщины слоя материала. Так, например, электрическая прочность асбеста составляет 200—250 киловольт на один сантиметр (киловольт — одна тысяча вольт).

Изолирующие материалы, применяемые в электротехнике и радиотехнике, бывают естественные и искусственные. К естественным, или минеральным, изолирующим материалам можно отнести асбест, слюду и др., к искусственным — пластмассы и керамические материалы.

Изолирующие пластмассы состоят из естественных или искусственных смол (связывающие вещества), которыми скрепляются вещества, называемые наполнителями (бумага, хлопчатобумажные ткани и др.). Наиболее употребительные пластмассы — гетинакс, текстолит, эбонит, плексигласс.

Керамические изолирующие материалы изготавливаются из различного минерального сырья путем спекания его при высокой температуре. К числу таких материалов относятся электротехнический фарфор и радиофарфор.

Советские ученые проделали большую работу по изысканию новых искусственных изолирующих материалов. У нас разработаны новые стекловолокнистые изолирующие материалы, обладающие высокой электрической прочностью, большой термической устойчивостью и малой гигроскопичностью.

Профессор К. А. Андрианов создал новый тип синтетической эмали (винифлексовая изоляция), который отличается большой механической прочностью, хорошей эластичностью, влагостойкостью и теплопроводностью. Этот вид изоляции значительно упрощает и удешевляет производство электрических машин.

Другой наш ученый Н. П. Богородицкий в 1942 г. создал новый вид керамической изоляции — так называемый ультрафарфор, который по своим качествам значительно превышает имеющиеся материалы этого типа. За создание ультрафарфора Н. П. Богородицкий удостоен Сталинской премии.

Наряду с твердыми изолирующими материалами в электротехнике используются и жидкие. Наиболее употребительные из них — минеральные масла и всевозможные лаки.

Газы при нормальных условиях также считаются непроводниками. Под нормальными условиями следует понимать отсутствие факторов, вызывающих ионизацию газов, или, как принято говорить, отсутствие ионизаторов. Процесс ионизации заключается в том, что нейтральные молекулы газа распадаются на ионы, т. е. положительно и отрицательно заряженные частицы. Чаще всего отрицательно заряженными частицами в газах являются электроны, которые легко выбиваются из молекул вследствие усиления их столкновений при по-

вышении температуры газа. Лишившись электронов, молекулы превращаются в положительно заряженные ионы («ион» по-гречески означает «идущий»).

Ионизация в газах может быть вызвана также ультрафиолетовыми лучами, рентгеновскими лучами, излучением радиоактивных веществ и другими факторами.

Под действием ионизаторов в газах появляются ионы, поэтому газы начинают проводить электрический ток и перестают быть непроводниками. Сам ток в газах отличается от тока в твердых проводниках тем, что в газах происходит двустороннее движение электрических зарядов. Электроны под действием сил электрического поля движутся к положительному зажиму источника, а положительно заряженные ионы — к отрицательному. Попадая на отрицательные зажимы, ионы получают электроны и опять превращаются в нейтральные молекулы. В дальнейшем эти молекулы вновь подвергаются действию ионизатора, т. е. опять распадаются на ионы, и процесс снова повторяется.

С прекращением действия ионизаторов газы перестают проводить электрический ток. Близким к идеальному диэлектрику следует считать высокий вакуум,

§ 15. ВЕЛИЧИНА ТОКА И КОЛИЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Рассмотренная нами электрическая цепь термоэлемента называется также **простой, или неразветвленной, электрической цепью**. Если зажимы элемента, кроме проводника AB , соединить еще проводником AaB (рис. 12), то получится **сложная, или разветвленная, электрическая цепь**. Разветвленных цепей может быть бесчисленное множество. Каждая такая цепь состоит из простых, неразветвленных участков. Цепь, изображенная на рис. 12, состоит из трех неразветвленных участков AaB , AB и ADB .

Простая цепь, а также неразветвленные участки сложных цепей обладают тем свойством, что в них **через любое поперечное сечение проводников проходит одинаковое число единичных зарядов, или одинаковое количество электричества**.

Это объясняется тем, что свободные электроны при своем движении в электрических цепях нигде не накапливаются, т. е. сколько их подходит к любому поперечному сечению проводника, столько же и отходит. В самом деле, если бы электроны где-либо накапливались, то в месте накопления образовался бы большой отрицательный заряд (пробка), который прекратил бы дальнейшее движение электронов в цепи, чего на практике никогда не наблюдается.

Количество электричества, проходящего в секунду через поперечное сечение проводника простой электрической цепи

или неразветвленного участка сложной цепи, принято называть величиной тока и обозначать буквой I .

Единицей измерения величины тока служит ампер (a , A). Ампер — это такая величина тока, при которой через поперечное сечение проводника проходит один кулон электричества в секунду. Для измерения слабых токов пользуются тысячными и миллионными долями ампера — миллиамперами (ma) и микроамперами ($мкa$).

Величина тока измеряется специальным прибором, называемым амперметром. Амперметр включается в разрыв (последовательно) того неразветвленного участка цепи, на котором желательно измерить величину тока. На рис. 12 показано включение миллиамперметра для измерения величины тока на участке AB .

Если известна величина тока в цепи и время его прохождения, то общее количество электричества, проходящего по участку цепи за это время, можно определить по формуле

$$Q = It \text{ кулон,} \quad (10)$$

где I — величина тока в цепи в амперах;

t — время прохождения тока в секундах.

В соответствии с единицами измерения величин тока и времени, входящими в формулу (10), кулон называют также ампер-секундой ($a-c$). Если же время подставить в формулу в часах, то получим более крупную единицу — ампер-час ($a-ч$). Один ампер-час равен 3600 ампер-секундам.

§ 16. СОПРОТИВЛЕНИЕ И ПРОВОДИМОСТЬ ТВЕРДЫХ ПРОВОДНИКОВ

Перемещаясь в замкнутой электрической цепи, свободные электроны непрерывно сталкиваются как между собой, так и со связанными электронами. В результате скорость движения электронов все время меняется, а путь вместо прямой представляет собой ломаную линию (рис. 13).

Препятствия, встречаемые электронами, приводят к тому, что под действием напряженности электрического поля источника в цепи устанавливается не максимальная, а лишь средняя скорость направленного движения электронов.

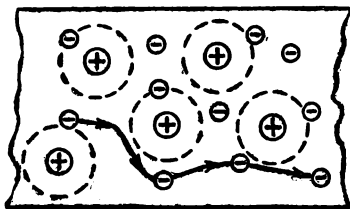


Рис. 13

Эта скорость при неизменной величине напряженности электрического поля также остается неизменной и определяет собой величину тока в цепи. С увеличением количества препятствий скорость движения электронов в цепи уменьшается, а с уменьшением этих препятствий

увеличивается (если, конечно, напряженность электрического поля в обоих случаях остается постоянной).

Совокупность всех препятствий, которые встречают свободные электроны на пути своего движения по проводнику, называется электрическим сопротивлением и обозначается буквой R или r .

Единицей измерения сопротивления служит ом (*ом*, Ω). Сопротивлением в один ом обладает столбик ртути длиной 106,3 см с поперечным сечением 1 мм² при температуре 0° С. Более крупными единицами являются килоом (*ком*), т. е. тысяча ом, и мегом (*мгом*) — миллион ом.

Вместо сопротивления часто пользуются обратной ему величиной, называемой проводимостью, G . **Проводимость проводников — это их способность пропускать через себя электрический ток в большей или меньшей степени.**

В математике две величины считаются обратными, если они в произведении дают единицу. Поэтому для сопротивления и проводимости можно написать

$$RG = 1.$$

Отсюда

$$G = \frac{1}{R} \quad (11)$$

и

$$R = \frac{1}{G}. \quad (12)$$

Проводимость измеряется в $\frac{1}{\text{ом}}$, как это следует из формулы (11). Таким образом, если известна одна из величин, характеризующих проводник (например, сопротивление), то другая величина может быть вычислена по одной из полученных формул.

Проводимость твердых проводников называется электронной проводимостью. Таким названием подчеркивается, что электрический ток в твердых проводниках обусловлен наличием в них свободных электронов.

§ 17. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА И НАПРЯЖЕНИЕ ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ПОТЕНЦИАЛ В ТОЧКАХ ЦЕПИ

При перемещении свободных электронов по соединительному проводнику (рис. 12) они расходуют энергию электрического поля элемента на преодоление сопротивления проводника.

Однако проволоки самого элемента тоже обладают сопротивлениями, и на их преодоление также расходуется энергия внешних сил. Эта энергия превращается в тепловую, о чем

свидетельствует нагревание проволок элемента при прохождении тока в замкнутой цепи.

Таким образом, практически не вся энергия внешних сил, вызывающих электризацию зажимов источника тока, превращается в электрическую на внешнем участке цепи, часть ее расходуется в самом источнике на преодоление его собственного сопротивления. Эта часть энергии составляет неизбежные потери при непрерывной электризации тел.

Так как внешние силы возникают в самом источнике, когда к нему подводится извне тот или иной вид энергии, то для простоты рассуждений считают, что электрические заряды в цепи перемещает сам источник, расходуя на это получаемую им энергию.

Исходя из такого представления об источнике, установили величину, называемую электродвижущей силой источника. **Под электродвижущей силой следует понимать полную энергию, которую источник может расходовать на перемещение каждого единичного заряда по всей замкнутой цепи.** Электродвижущую силу источника обозначают буквой E .

Численно электродвижущая сила равна энергии внешних сил, перемещающих единичный заряд внутри источника с положительного его зажима на отрицательный против направления сил электрического поля. Поскольку электродвижущая сила есть энергия, приходящаяся на единичный заряд, то ее, как и потенциал, измеряют в вольтах.

Большую часть электродвижущей силы, расходуемой источником на внешнем участке цепи, называют напряжением или разностью потенциалов на зажимах источника и обозначают буквой U . В соответствии с таким определением можно написать формулу для определения величины напряжения на зажимах источника

$$U = U_A - U_B,$$

где U_A — наибольший потенциал на отрицательном зажиме элемента;

U_B — нулевой потенциал на его положительном зажиме.

Меньшую часть электродвижущей силы, расходуемой источником на внутреннем участке цепи (т. е. в самом источнике), называют внутренним падением напряжения и обозначают через U_0 .

Таким образом, величина электродвижущей силы источника может быть выражена формулой

$$E = U + U_0.$$

Применяя наши знания об электрическом поле к термоэлементу, можем утверждать, что каждой точке внешней цепи элемента соответствует определенный потенциал его электрического поля. Физически это означает, что в каждой точке

цепи единичный заряд обладает энергией, равной по величине потенциалу поля в этой же точке. По мере продвижения заряда его энергия расходуется на преодоление сопротивления цепи, поэтому потенциал в каждой последующей точке цепи всегда меньше, чем в предыдущей.

§ 18. ЗАКОН ОМА ДЛЯ ПРОСТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Исследуя простую электрическую цепь, немецкий ученый Г. С. Ом в 1827 году установил зависимость, известную в науке под названием закона Ома:

$$I = \frac{E}{R_1 + R_0}, \quad (13)$$

где E — электродвижущая сила источника в вольтах;

R_1 — сопротивление внешней цепи в омах;

R_0 — сопротивление внутреннего участка или сопротивление источника в омах;

I — величина тока в цепи в амперах.

Закон Ома является основным законом постоянного тока. С физической точки зрения закон Ома означает, что чем больше электродвижущая сила, т. е. энергия, которую расходует источник на перемещение каждого единичного заряда, тем быстрее движутся заряды, так как величина тока характеризует собой именно скорость движения зарядов.

Преобразовав несколько формулу (13), получим выражение для определения электродвижущей силы:

$$E = IR_1 + IR_0. \quad (14)$$

Из этого выражения видно, что электродвижущая сила состоит из двух частей: напряжения на зажимах источника $U = IR_1$ и внутреннего падения напряжения $U_0 = IR_0$. Поэтому формулу (14) можно написать в таком виде

$$E = U + U_0.$$

К этой формуле мы пришли в предыдущем параграфе, не зная еще закона Ома. Обратимся теперь к равенству $U = IR_1$, определяющему собой напряжение на зажимах источника.

Зная, что напряжение на зажимах есть разность потенциалов на тех же зажимах, мы можем это равенство написать и так:

$$U_A - U_B = IR_1. \quad (15)$$

Эта формула показывает, каким образом можно вычислять разность потенциалов не только на зажимах источника, но и на любом участке внешней цепи.

Из формулы (15) видно, что разность потенциалов, или падение напряжения на зажимах источника, зависит только

от величины тока I и сопротивления R_1 внешней цепи. Величина тока в простой цепи везде одинакова, и каждый участок цепи обладает своим сопротивлением. Поэтому для любого участка внешней цепи, хотя бы для участка cb (рис. 12), разность потенциалов, или падение напряжения, также можно вычислять по формулам

$$U = IR \quad (16)$$

и

$$U_c - U_b = IR,$$

где I — величина тока, проходящего по участку, в амперах;

R — сопротивление участка в омах;

U_c и U_b — потенциалы в точках c и b ;

U — падение напряжения на участке, численно равное разности $U_c - U_b$.

Определим величину тока из формулы $U = IR$:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (17)$$

Эта формула — следствие из закона Ома, хотя ее часто называют законом Ома для участка внешней цепи.

Следствие из закона Ома позволяет определять не только ток и напряжение на любом участке внешней цепи, но и потенциалы отдельных точек цепи. Действительно, для какого-либо участка внешней цепи, например для участка cB (рис. 12), мы можем написать

$$U_c - U_B = IR.$$

Но $U_B = 0$, тогда потенциал в точке c будет

$$U_c = IR.$$

Таким образом, для вычисления потенциала в любой точке внешней цепи достаточно умножить величину тока на сопротивление участка, отделяющего рассматриваемую точку от точки с нулевым потенциалом.

Пользуясь следствием из закона Ома, можно определить и сопротивление участка цепи по формуле

$$R = \frac{U}{I}. \quad (18)$$

Если в этой формуле $U = 1$ вольту и $I = 1$ амперу, то $R = 1$ ому, т. е.

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

Следовательно, проводник обладает сопротивлением в 1 ом в том случае, когда по нему проходит ток в 1 ампер при напряжении в 1 вольт.

§ 19. ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ПРОВОДНИКОВ ОТ ИХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Если известны геометрические размеры проводника и материал, из которого он сделан, то его сопротивление можно определить по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ ом}, \quad (19)$$

где l — длина проводника в метрах;

S — площадь поперечного сечения в квадратных миллиметрах;

ρ — удельное сопротивление, т. е. сопротивление данного проводника длиной 1 м, сечением 1 мм² при температуре 20° С.

Прямо пропорциональная зависимость сопротивления проводника от его длины объясняется тем, что с увеличением длины возрастает и количество препятствий, встречаемых электронами на пути своего движения. Наличие же обратной пропорциональной зависимости между сопротивлением проводника и площадью его поперечного сечения можно объяснить так.

Если, не изменяя длины проводника, образующего внешнюю цепь источника тока, увеличить площадь его поперечного сечения, то количество свободных электронов в проводнике увеличится, поэтому увеличится и количество электричества, переносимого электронами через поперечное сечение проводника в секунду, т. е. увеличится соответственно и величина тока в проводнике.

Согласно же закону Ома ($I = \frac{U}{R}$) величина тока при неизменном напряжении на участке может возрасти только вследствие уменьшения сопротивления участка, следовательно, с увеличением площади поперечного сечения проводника его сопротивление уменьшается.

Удельное сопротивление характеризует собой внутреннюю структуру проводников, поэтому различно у разных металлов и их сплавов. Значения удельных сопротивлений для наиболее употребительных проводников приводятся в табл. 3.

Измеряется удельное сопротивление в $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$. Эту единицу легко получить из формулы (19).

Подобно тому как сопротивление R может быть выражено через проводимость G , удельное сопротивление ρ также можно выразить через удельную проводимость σ :

$$\rho = \frac{1}{\sigma},$$

где σ — удельная проводимость проводника в $\frac{\text{м}}{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}$.

Таблица 3

Удельные сопротивления проводников

Название материала	Удельное сопротивление при 20° С	Удельная проводимость при 20° С	Состав сплава
Серебро	0,0159	61,0	
Медь	0,0175	57,0	
Алюминий	0,0287	34,0	
Вольфрам	0,0612	16,0	
Железо	0,132	10,0	
Нейзильбер	0,3	2,0	Cu — 60,13%; Zn — 25,37%; Ni — 14,03%; Fe — 0,3%
Никелин	0,332	3,0	Cu — 61,63%; Zn — 19,67%; Ni — 18,46%; Fe — 0,24%
Манганин	0,374	2,68	Cu — 87,24%; Mn — 10,26%; Ni — 1,77%; Fe — 0,52%
Константан	0,48	2,04	Cu — 60%; Ni — 40%
Нихром	1,11	0,9	Cr — 15%; Ni — 62%; Fe — 23%
Меганир	1,4	0,71	Fe — 65%; Cr — 30%; Al — 5%

Подставив значение удельного сопротивления в формулу $R = \rho \frac{l}{S}$, получим

$$R = \frac{l}{\sigma S}. \quad (20)$$

Обе эти формулы равноценны, и ими пользуются в зависимости от того, какая из удельных величин известна. Значения удельных проводимостей приведены в табл. 3, но, зная удельные сопротивления, эти проводимости легко вычислить по формуле

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \frac{M}{\alpha M \cdot M M^2}.$$

Проводники обладают сравнительно небольшими сопротивлениями — от долей до нескольких сот ом — в зависимости от геометрических размеров проводника. Диэлектрики, наоборот, обладают очень большими сопротивлениями, измеряемыми миллионами ом и выше. Например, у обычных осветительных проводов сопротивление изолирующего слоя резины должно быть не менее 500 000 ом.

Опыт показывает, что с увеличением температуры сопротивление твердых проводников увеличивается, а с уменьшением ее уменьшается. Изменение сопротивлений проводников можно объяснить молекулярно-кинетической теорией. Согласно этой теории тепловая энергия, получаемая извне твердыми телами, вызывает в них колебательное движение ато-

мов около некоторых средних положений. Частота и амплитуда (размах) колебаний атомов зависят от температуры тел и с увеличением ее возрастают. Поэтому тела при нагревании увеличивают свои геометрические размеры.

Увеличение частоты колебаний атомов приводит к более частым столкновениям свободных электронов со связанными, а следовательно, и к увеличению сопротивления проводника. Уменьшение частоты колебаний атомов приводит к обратным результатам.

Зависимость сопротивления проводника от температуры в пределах от -100 до $+100^\circ\text{C}$ определяется по формуле

$$R_2 = R_1 + R_1 \alpha (t_2^\circ - t_1^\circ), \quad (21)$$

где R_1 — начальное сопротивление проводника при температуре t_1° ;

R_2 — конечное сопротивление проводника при температуре t_2° ;

α — температурный коэффициент сопротивления, который показывает, насколько увеличивается или уменьшается сопротивление проводника на каждый ом при изменении его температуры на один градус.

Температурный коэффициент сопротивления измеряется в $\frac{1}{^\circ\text{C}}$ (единица на градус Цельсия). Числовые значения температурных коэффициентов сопротивления для некоторых проводников даны в табл. 4.

Таблица 4
Температурные коэффициенты сопротивления

Название проводника	$\alpha \frac{1}{^\circ\text{C}}$
Медь	0,004
Алюминий	0,0038
Железо	0,0048
Серебро	0,00377
Нейзильбер	0,0036
Никелин	0,00028
Нихром	0,021
Манганин	0,000015

Исследуя сопротивления твердых проводников при очень низких температурах, ученые установили весьма важное явление, называемое сверхпроводимостью. Явление заключается в том, что при температурах, близких к абсолютному нулю (-273°C), сопротивление проводников резко уменьшается и практически становится равным нулю.

Это явление еще не изучено, поэтому не имеет удовлетворительных объяснений.

§ 20. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Любая электрическая цепь обычно включает в себя следующие основные элементы:

- источник электрической энергии;
- приемник электрической энергии;
- измерительные приборы (вольтметр, амперметр и т. п.);
- соединительные провода;
- рубильник.

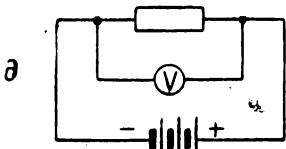
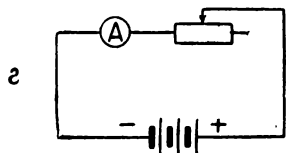
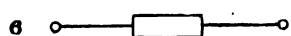
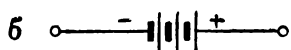
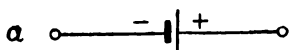


Рис. 14

Условное изображение электрической цепи на чертеже называется ее электрической схемой.

Для упрощения графического изображения электрических схем широко применяют условные (стандартные) обозначения некоторых элементов электрических цепей (рис. 14). Например:

а) Источники электрической энергии (гальванический элемент или аккумулятор) обозначают двумя черточками (рис. 14, а). Короткая толстая черточка обозначает плюс, тонкая длинная — минус.

б) Батарея гальванических элементов или аккумуляторов обозначается несколькими (четным количеством) черточками (рис. 14, б).

в) Сопротивления приемников электрической энергии обозначаются в виде небольших прямоугольников (рис. 14, в), а соединительные провода — прямыми тонкими линиями. Провода в электрических цепях применяют обычно медные изолированные с очень небольшим сопротивлением, чтобы избежать излишнего расхода электрической энергии на их нагревание.

г) Амперметр изображается в виде кружка с буквой А посередине (рис. 14, г). Прибор служит для измерения величины тока, включается последовательно с приемником, величину тока которого нужно измерить.

Амперметр обладает очень малым сопротивлением (тысячные доли ома), поэтому его нельзя подключать к источнику тока без приемника, так как такое включение приведет к перегоранию обмотки прибора от большого тока.

д) Вольтметр также изображается в виде кружка, но с буквой V посередине (рис. 14, д). Прибор служит для измерения напряжений как на зажимах источника тока, так и на

любом участке внешней цепи. Вольтметр подключается параллельно тому участку цепи, напряжение на котором требуется измерить. В отличие от амперметра вольтметр обладает очень большим сопротивлением (сотни и тысячи ом), поэтому может быть присоединен один к источнику тока.

Как вольтметр, так и амперметр на лицевой стороне имеют шкалу с делениями и подвижную указательную стрелку для отсчета измеряемой величины. Для включения в электрическую цепь приборы снабжаются зажимами, или клеммами, к которым подключаются соединительные провода.

В качестве приемников электрического тока в лабораторных условиях часто используют ползунковые реостаты. Главной частью реостата является проволока из сплава с высоким сопротивлением (нейзильбер, нихром). Эту проволоку накладывают в виде спирали (виток к витку) на фарфоровую трубку, укрепленную на металлических стойках. Изоляцией между витками проволоки служит слой окалины, который получается при изготовлении проволоки. Концы проволоки соединяют с зажимами, изолированно укрепленными на стойках.

В верхней части стоек (изолированно от них) крепится металлический стержень с металлическим ползунком. Ползунком плотно касается витков проволоки и может перемещаться по стержню, изменяя при этом сопротивление цепи.

В местах касания ползунком витков проволоки окалина счищается, чем обеспечивается хороший контакт. Стержень ползунка также имеет зажимы.

На каждом реостате обязательно указываются сопротивление его проволоки R_p при температуре 20°C и наибольшая допустимая величина тока I_p . Зная эти две величины, нетрудно по формуле $U_p = I_p R_p$ определить напряжение, под которое можно безопасно включать данный реостат. В электрических схемах реостат изображается так, как показано на рис. 14, з.

Для замыкания и размыкания электрических цепей служат рубильники. На рис. 15, а показан двухполюсный рубильник. Он состоит из двух металлических ножей, шарнирно соединенных одними своими концами с короткими металлическими стойками. Противоположные концы ножей соединяются между собой изоляционной перемычкой с укрепленной на ней рукояткой. Изображение двухполюсного рубильника в электрических схемах показано на рис. 15, б.

В качестве примера на рис. 16 показана полная электрическая схема простой электрической цепи при включенном рубильнике. Рубильник монтируется так, чтобы при выключении ножи его не находились под напряжением, т. е. оставались подключенными не к источнику тока, а к приемнику. Вольтметр включается в цепь до рубильника, чтобы еще до

включения приемника знать, какое напряжение дает источник и не опасно ли на него включать данный приемник. Амперметр можно включать как до рубильника, так и после него.

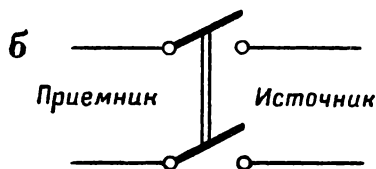
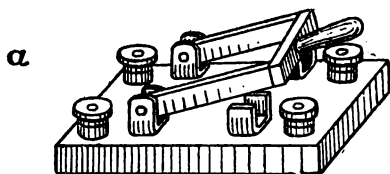


Рис. 15

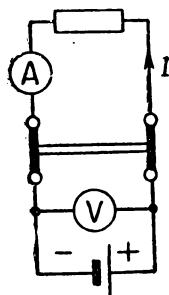


Рис. 16

§ 21. УСЛОВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ТОКА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ В ЦЕПИ. ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ

До появления электронной теории считали, что электрический ток в твердых проводниках представляет собой движение положительного электричества, поэтому за направление тока во внешней цепи принимали его направление от положительно заряженного зажима источника к отрицательному.

После открытия электрона было установлено, что физическое направление тока в твердых проводниках прямо противоположно принятому. Однако, чтобы не вносить путаницы для изучающих электротехнику, решено было оставить в науке ранее принятое направление тока и пользоваться им как условным во всех теоретических вопросах.

Итак, будем считать в дальнейшем, что ток во внешней цепи всегда направлен от положительного зажима источника к отрицательному. При таком направлении тока, соответствующем движению в цепи положительных зарядов, следует считать, что наибольшим потенциалом обладает положительный зажим источника и, наоборот, нулевым потенциалом — его отрицательный зажим (рис. 17).

Условное направление тока дает некоторое удобство, когда прибегают к относительным, т. е. к положительным и отрицательным, значениям потенциалов.

Ознакомимся с этими значениями.

Принимая отрицательный зажим источника за точку с нулевым потенциалом, мы можем относительно этого зажима

вычислить потенциалы всех других точек по формуле $U_c = IR$, где U_c — потенциал в рассматриваемой точке c , I — величина тока в цепи, R — сопротивление участка, отделяющего точку c от отрицательного зажима источника.

Оказывается, вовсе не обязательно отрицательный зажим источника принимать за точку с нулевым потенциалом при вычислении разности потенциалов на любом участке внешней

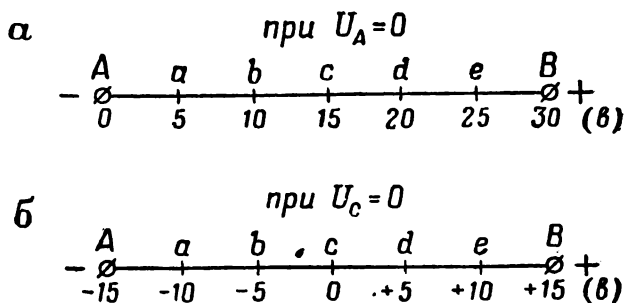


Рис. 17

цепи. За такую точку можно условно принять любую точку внешней цепи и от нее вычислять потенциалы всех других точек. При такой условности потенциалы всех точек цепи примут лишь иные числовые значения, отличные от истинных, разность же потенциалов, т. е. энергия, отдаваемая единичным зарядом на данном участке цепи, не изменится.

Принимая, однако, любую точку внешней цепи за точку с нулевым потенциалом, необходимо по правилам математики новые значения потенциалов других точек брать со знаком плюс или минус в зависимости от того, больше или меньше истинные потенциалы этих точек по сравнению с истинным потенциалом, принятым за нулевой.

Поясним сказанное. На рис. 17, *а* под внешней цепью указаны значения истинных потенциалов для точек a , b , c , d и e , когда за точку с нулевым потенциалом принят отрицательный зажим A источника. Теперь примем условно точку c за точку с нулевым потенциалом и выразим относительно нее потенциалы других точек.

Так как истинные потенциалы точек внешней цепи повышаются по мере приближения к положительному зажиму источника, то новые значения потенциалов точек, расположенных правее точки c , следует считать положительными, а левее ее — отрицательными. Действительно, если $U_c = 0$, то по правилам математики больше нуля может быть только положительное число, а меньше нуля — отрицательное.

Новые значения условных потенциалов приведены под

соответствующими значениями истинных потенциалов на рис. 17, б.

Вычислим разность потенциалов на участке ad по истинным и условным потенциалам. Для истинных потенциалов $U_d - U_a = 20 - 5 = 15$ в, а для условных $U_d - U_a = 5 - (-10) = 15$ в.

Таким образом, разность потенциалов на любом участке внешней цепи, действительно, не зависит от того, какую точку внешней цепи принять за точку с нулевым потенциалом.

§ 22. ПЕРВОЕ И ВТОРОЕ ПРАВИЛА КИРХГОФА

Закон Ома позволяет определять величину тока в простых цепях (рис. 18), но для исследования сложных цепей (рис. 19) знания только этого одного закона уже недостаточно. Сложные цепи исследуются на основе первого и второго правил Кирхгофа (немецкий ученый).

Первое правило Кирхгофа формулируется так: **в сложной электрической цепи сумма токов, подходящих к любой точке разветвления, всегда равна сумме токов, отходящих от этой точки.**

Для некоторого узла сложной цепи (рис. 20) на основании первого закона можно написать

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_4 + I_5. \quad (22)$$

Эта формула и представляет собой математическое выражение первого правила Кирхгофа. Количество слагаемых в правой и левой частях формулы может быть любое. Если все члены перенести в левую часть, то формула примет вид

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0. \quad (23)$$

В этом виде первое правило можно сформулировать так: **алгебраическая сумма токов, подходящих к точке разветвления, равна нулю.**

При пользовании формулой (23) токи, подходящие к точке разветвления,

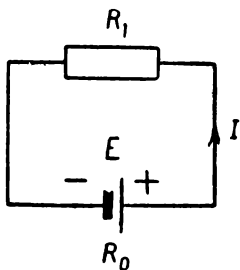


Рис. 18

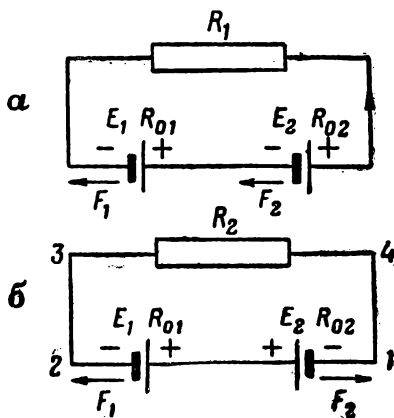


Рис. 19

нужно брать со знаком плюс, а отходящие — со знаком минус.

Физический смысл первого правила Кирхгофа заключается в том, что в любой электрической цепи свободные электроны нигде не накапливаются, поэтому всегда сколько их подходит к точке разветвления, столько же и уходит от нее.

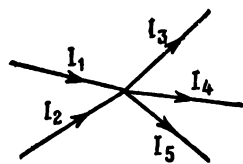


Рис. 20

Перейдем теперь ко второму правилу, которое по существу является развитием закона Ома в применении к сложным электрическим цепям.

Известно, что для простой электрической цепи (рис. 18) э. д. с. источника может быть выражена формулой

$$E = IR_1 + IR_0,$$

т. е. в замкнутой электрической цепи электродвижущая сила источника равна сумме падений напряжения на ее отдельных участках.

Усложним несколько цепь (рис. 18), включив последовательно с первым другой источник — с электродвижущей силой E_2 и внутренним сопротивлением R_{02} . Этот источник можно включить согласно с первым (рис. 19, а) или навстречу ему (рис. 19, б).

В первом случае внешние силы F_1 и F_2 , действующие в источниках, совпадают по направлению, поэтому каждый единичный заряд, пройдя оба источника, получает от них энергию, равную сумме электродвижущих сил E_1 и E_2 . Оба источника как бы помогают друг другу перемещать заряды в цепи по направлению движения часовой стрелки.

Во втором случае (рис. 19, б) внешние силы источников направлены в противоположные стороны. При этом возможны следующие варианты.

Если внешние силы равны (когда $E_1 = E_2$), то движение зарядов невозможно и тока в цепи не будет.

При $F_1 > F_2$ (когда $E_1 > E_2$) каждый единичный заряд, пройдя оба источника, получает энергию, равную разности их электродвижущих сил, т. е. $E_1 - E_2$ (второй источник мешает первому перемещать заряды). Заряды движутся под действием первого источника по часовой стрелке.

При $F_1 < F_2$ (когда $E_1 < E_2$) полная энергия каждого единичного заряда равна разности $E_1 - E_2$, поэтому направление движения зарядов противоположно предыдущему.

Следовательно, к усложненной цепи также можно применить закон Ома, но в такой формулировке: в замкнутой электрической цепи алгебраическая сумма электродвижущих сил источников равна сумме падений напряжения на ее участках. Под алгебраической суммой следует понимать сумму электродвижущих сил, взятых с разными знаками.

Знаки для электродвижущих сил устанавливают следующим образом.

Прежде всего считают, что электродвижущая сила источника имеет такое же направление, как и ток во внешней цепи, т. е. от положительного зажима источника к отрицательному, ибо в каком направлении движется заряд (идет ток), в таком же направлении вместе с ним движется и энергия. Так как падение напряжения ($IR = U$) является частью электродвижущей силы, то считают, что оно также имеет направление, одинаковое с направлением тока в цепи.

Исходя из такого направления, условились числовые значения электродвижущей силы и падения напряжения считать положительными, если при обходе замкнутой цепи их направления совпадают с направлением обхода. В противном случае эти значения считают отрицательными.

Пусть ток в цепи (рис. 19, б) направлен по часовой стрелке. Направление обхода цепи может быть произвольным. Обычно его делают по направлению движения часовой стрелки. Начнем обход цепи с точки 1. Сначала мы встречаем второй источник. Направление его электродвижущей силы совпадает с направлением обхода, следовательно, числовое значение этой электродвижущей силы нужно брать со знаком плюс ($+E_2$). Направление электродвижущей силы первого источника не совпадает с направлением обхода, поэтому ее числовое значение следует взять со знаком минус ($-E_1$).

Что касается падений напряжения на отдельных участках цепи, то их числовые значения следует брать со знаком плюс, так как в нашем случае направление всех падений напряжения одинаково (направление тока в простой цепи везде одинаково) и совпадает с направлением обхода.

Установив знаки для числовых значений электродвижущих сил и падений напряжения, мы можем написать уравнение для нашей цепи

$$E_2 - E_1 = IR_2 + IR_{02} + IR_{01}.$$

Из уравнения находим величину тока в цепи

$$I = \frac{E_2 - E_1}{R_2 + R_{02} + R_{01}}.$$

В случае если при решении задач величина тока получится со знаком минус, то это будет означать, что направление тока в цепи принято неправильно и его нужно изменить на обратное.

В сложных электрических цепях направление токов на отдельных неразветвленных участках может быть различным, поэтому второе правило Кирхгофа формулируется так: **в любом замкнутом контуре сложной электрической цепи алгебраическая сумма электродвижущих сил равна алгебраиче-**

ской сумме падений напряжения на отдельных участках контура.

Математически второе правило можно выразить уравнением

$$\sum E = \sum IR, \quad (24)$$

где \sum — алгебраическая сумма однородных величин (в данном случае электродвижущих сил и падений напряжения).

Поясним применение второго правила на примере сложной цепи, изображенной на рис. 21. В этой цепи — три самостоятельных замкнутых контура $abcfa$, $fcdef$ и $abdea$. К каждому из них можно применять второе правило Кирхгофа. Для этого сначала указывают в электрической схеме цепи принятое направление токов от каждого источника. Затем производят обход (начиная с любой точки) того или иного контура и пишут для него уравнение вида

$$\sum E = \sum IR.$$

Так, для контура $abcfa$ это уравнение имеет такой вид

$$-E_1 + E_2 = -I_1 R_{01} - I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_2 R_{02},$$

или

$$-E_1 + E_2 = -I_1 (R_{01} + R_1) + I_2 (R_{02} + R_2).$$

Для лучшего уяснения второго правила решим числовой пример применительно к схеме, изображенной на рис. 21.

Пример 1. Дано: $E_1 = 20$ в; $E_2 = 10$ в; $E_3 = 30$ в; $R_1 = 40$ ом; $R_{01} = 1$ ом; $R_2 = 20$ ом; $R_{02} = 2$ ом; $R_3 = 50$ ом; $R_{03} = 1$ ом.

Определить величины токов и их направления в цепи.

Не следует думать, что направления токов будут именно такими, какими мы их указали на схеме. В сложных цепях направления токов на отдельных участках зависят от соотношения электродвижущих сил источников, а также от сопротивлений приемников (R_1 , R_2 , R_3) и самих источников (R_{01} , R_{02} , R_{03}).

В нашем случае наибольшей электродвижущей силой обладает третий источник, поэтому может получиться так, что он пошлет свой ток не только через приемник с сопротивлением R_3 , но частично и через первый и второй источники или же только через один из них. Истинное направление токов можно установить, только применив второе правило Кирхгофа.

Решение. Имея три неизвестных I_1 , I_2 и I_3 , мы должны составить три уравнения. Первое уравнение можно написать на основе первого правила по отношению к точке f :

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0. \quad (а)$$

Для составления двух других уравнений произведем обход любых двух контуров цепи, хотя бы контуров $abcfa$ и $fcdef$.

Для контура $abcfa$

$$-E_1 + E_2 = -I_1 (R_{01} + R_1) + I_2 (R_{02} + R_2). \quad (б)$$

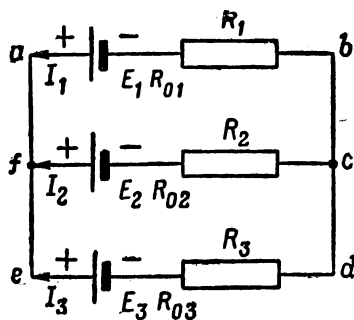


Рис. 21

Для контура $f c d e f$

$$-E_2 + E_3 = -I_2 (R_{02} + R_2) + I_3 (R_{03} + R_3). \quad (в)$$

Для решения полученной системы трех уравнений применим способ подстановки.

Из уравнения (а) имеем

$$I_1 = -I_2 - I_3.$$

Подставив значение тока I_1 в уравнение (б), получим

$$-E_1 + E_2 = (I_2 + I_3) (R_{01} + R_1) + I_2 (R_{02} + R_2). \quad (г)$$

Теперь подставим числовые значения электродвижущих сил и сопротивлений в уравнения (в) и (г):

$$-10 + 30 = -22I_2 + 51I_3, \text{ или } 20 = -22I_2 + 51I_3; \quad (д)$$

$$-20 + 10 = 41(I_2 + I_3) + 22I_2, \text{ или } -10 = 63I_2 + 41I_3. \quad (е)$$

Решим уравнения (д) и (е) способом подстановки. Из уравнения (е) найдем

$$I_2 = \frac{-10 - 41I_3}{63}. \quad (ж)$$

Подставив значение тока I_2 в уравнение (д), получим

$$20 = \frac{-22(-10 - 41I_3)}{63} + 51I_3,$$

или после преобразований

$$1040 = 4115I_3.$$

Отсюда

$$I_3 = \frac{1040}{4115} \approx 0,25 \text{ а.}$$

Подставив значение тока I_3 в равенство (ж), определим I_2 :

$$I_2 = \frac{-10 - 41 \cdot 0,25}{63} = -0,32 \text{ а.}$$

Из уравнения (а) найдем

$$I_1 = -I_2 - I_3 = -(-0,32) - 0,25 = 0,32 - 0,25 = 0,07 \text{ а.}$$

Полученное отрицательное значение тока I_2 свидетельствует о том, что в электрической схеме цепи направление тока было указано неправильно. Действительное направление тока противоположно указанному на схеме.

Из примера видно, что в электрической цепи работают только первый и третий источники, токи которых проходят через второй источник и через приемник с сопротивлением R_2 . Поэтому ток $I_2 = -0,32 \text{ а}$ и получается равным сумме токов первого и третьего источников (по первому правилу Кирхгофа).

§ 23. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ИСТОЧНИКА ТОКА

В зависимости от сопротивления внешней цепи каждый источник электрической энергии может находиться в одном из трех режимов: в режиме холостого хода, в режиме нагрузки или в режиме короткого замыкания.

Рассмотрим особенности каждого из режимов в отдельности. Предварительно ознакомимся с некоторыми новыми терминами и величинами, характеризующими работу источника электрической энергии.

Приемники электрической энергии, включенные во внешнюю цепь, называются иначе нагрузкой источника.

Включить источник под нагрузку — значит присоединить к его зажимам с помощью рубильника приемники, потребляющие электрическую энергию. Увеличить нагрузку на источник — значит взять от него больший ток во внешнюю цепь; наоборот, уменьшить нагрузку — значит взять меньший ток.

Для изменения нагрузки нужно изменить сопротивление внешней цепи, т. е. сопротивление приемников. Это подтверждает следствие из закона Ома:

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

где U — напряжение на зажимах источника;

R — сопротивление внешней цепи.

Из формулы видно, что если напряжение на зажимах источника будет оставаться неизменным, то всякое изменение сопротивления внешней цепи будет приводить к изменению величины тока.

Начинающим изучать электротехнику кажется, что увеличить нагрузку на источник — значит увеличить сопротивление его внешней цепи. Такое представление ошибочно, и от него нужно отказаться. На самом деле увеличение сопротивления, как видно из формулы, приводит к уменьшению тока, т. е. к уменьшению нагрузки.

Нагрузка бывает постоянная и переменная. Если величина тока во внешней цепи не меняется, такую нагрузку называют постоянной, если же величина тока во внешней цепи изменяется, нагрузку называют переменной.

Приемники электрической энергии очень разнообразны. К ним относятся электрические лампы, нагревательные приборы (электрические плитки, печи, чайники и т. п.), электрические двигатели и различные специальные приборы. К приемникам электрической энергии относят и провода, по которым поступает ток от источника к перечисленным выше приемникам, поскольку в проводах также расходуется часть энергии на преодоление их сопротивления.

Для нормальной работы приемников требуется определенное напряжение, которое называется их номинальным, или расчетным, напряжением.

Каждый источник электрической энергии рассчитывается на определенные значения тока и напряжения. Эти значения, называемые расчетными, или номинальными, указываются в паспорте источника. Превышение номинальных

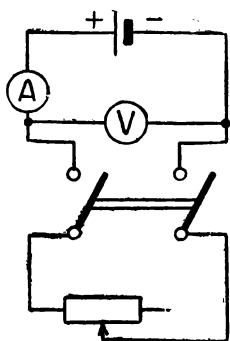


Рис. 22

значений тока при эксплуатации источников приводит к их перегреву и выходу из строя.

После этих предварительных замечаний перейдем к рассмотрению режимов работы источника, т. е. режима холостого хода, нагрузки и режима короткого замыкания.

Режимом холостого хода называется такой режим, при котором источник готов к питанию приемников, т. е. обладает электродвижущей силой, но внешняя цепь к нему не подсоединена. Электрическая схема режима холостого хода показана на рис. 22.

Для большинства источников электрической энергии такой режим безопасен, однако он экономически невыгоден, так как ведет к непроизводительному расходу энергии. Например, к термоэлементу при таком режиме нужно все время подводить тепловую энергию, которая бесполезно рассеивается в окружающем пространстве.

Основная особенность, характеризующая режим холостого хода любого источника, заключается в бесконечно большом сопротивлении во внешней цепи ($R_{xx} \approx \infty$), поскольку в цепь включен участок воздуха (между зажимами рубильника), практически не имеющий свободных электронов.

Вольтметр, подключенный к зажимам источника, образует его внешнюю цепь и является единственным приемником, работающим на холостом ходу. Однако сопротивление вольтметра очень велико, поэтому ток в цепи источника мал, а следовательно, потери также невелики.

Небольшое значение тока в цепи подтверждается законом Ома:

$$I = \frac{E}{R_V + R_0},$$

где E — электродвижущая сила источника;

R_V — сопротивление вольтметра и сопротивление проводов;

R_0 — внутреннее сопротивление источника;

I — величина тока в цепи.

Из формулы находим

$$E = U + IR_0,$$

где $U = IR_V$ — напряжение на зажимах источника, измеряемое вольтметром.

Сопротивление источника делают обычно небольшим, чтобы уменьшить внутреннее падение напряжения IR_0 ; таким

путем добиваются увеличения напряжения на зажимах источника для рационального использования его во внешней цепи.

Определим из последней формулы напряжение U :

$$U = E - IR_0. \quad (25)$$

В таком виде закон Ома называют уравнением источника или уравнением генераторного режима. Это уравнение позволяет установить, как изменяется напряжение источника на зажимах при различных нагрузках. К уравнению генераторного режима мы будем часто прибегать в дальнейшем, поэтому его следует хорошо запомнить.

Так как величина тока в режиме холостого хода вследствие большой величины сопротивления вольтметра невелика (миллиамперы), а внутреннее сопротивление источника также мало, то внутренним падением напряжения IR_0 в источнике можно пренебречь. Тогда формула (25) примет такой вид

$$U \approx E. \quad (26)$$

Физически это равенство означает, что на холостом ходу вольтметр измеряет величину, очень близкую к электродвижущей силе. Чем больше сопротивление вольтметра, тем точнее можно измерить электродвижущую силу источника, так как меньше будет внутреннее падение напряжения IR_0 , которым мы пренебрегаем (с увеличением R_V ток в цепи источника, работающего на холостом ходу, уменьшается).

Если включить рубильник внешней цепи, то источник из режима холостого хода перейдет в нормальный для него режим нагрузки (рис. 23). Режим нагрузки безопасен для источника в пределах номинального тока.

Особенность режима нагрузки заключается в том, что напряжение на зажимах источника изменяется с изменением нагрузки: с увеличением нагрузки оно уменьшается, а с уменьшением возрастает. Такое изменение напряжения легко объясняется уравнением генераторного режима:

$$U = E - IR_0,$$

где $I = I_n + I_V$ — величина тока в источнике.

Из формулы видно, что в этом случае ток во внешней цепи состоит из тока нагрузки I_n и тока вольтметра I_V . Для упрощения ток вольтметра можно пренебречь и считать, что $I = I_n$.

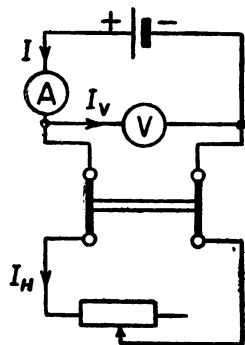


Рис. 23

Из уравнения (25) генераторного режима следует, что если электродвижущая сила источника остается неизменной, то с увеличением нагрузки, т. е. тока приемника, внутреннее падение напряжения IR_0 будет также увеличиваться, поэтому напряжение на зажимах источника, действительно, станет уменьшаться.

С уменьшением нагрузки получим обратную картину, т. е. напряжение будет расти и достигнет своей наибольшей величины ($U \approx E$), когда будет выключен рубильник и источник опять перейдет в режим холостого хода.

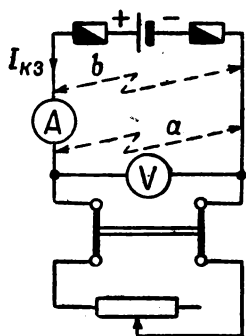


Рис. 24

Режим короткого замыкания — аварийный для источника. Специально в этот режим источник никогда не переводят, но он может возникнуть в результате неправильных условий эксплуатации источника и приводить к выходу источника из строя, если в электрической цепи своевременно не будут предприняты меры для защиты от последствий короткого замыкания.

Режим короткого замыкания характеризуется в первую очередь тем, что при нем источник оказывается включенным на очень малое сопротивление внешней цепи ($R_{кз} \approx 0$).

Короткое замыкание чаще всего возникает из-за порчи изоляции токоведущих частей электрической цепи (в соединительных проводах, в вольтметре, в приемнике и т. п.).

На рис. 24 изображена электрическая схема при режиме короткого замыкания. На ней питающие приемник провода показаны соединенными между собой зигзагообразным проводником *a* (условное обозначение места короткого замыкания, т. е. касания между собой оголенных проводов).

Короткое замыкание сопровождается резким увеличением тока в цепи по сравнению с номинальным током источника. От увеличения тока в первую очередь перегорает амперметр, если он попадает в цепь, образовавшуюся при коротком замыкании (на рис. 24 амперметр находится в этой цепи). Если же место короткого замыкания находится ближе к источнику, как показано на рис. 24 пунктирной линией *b*, то ток короткого замыкания мгновенно вызывает повышение температуры источника и закороченных проводов. От высокой температуры может загореться изоляция проводов и даже расплавиться медь (в зависимости от величины тока короткого замыкания). Источник при таких условиях, как правило, выходит из строя.

Для избежания последствий короткого замыкания каждую электрическую цепь в соответствии с нормами защищают

плавкими предохранителями, представляющими собой короткие провода из легкоплавкого металла (чаще всего из свинца). Предохранители рассчитывают по их поперечному сечению так, чтобы они свободно пропускали номинальный ток источника и перегорали мгновенно, при токах, превышающих номинальный на 20—30%. Предохранители включают в разрыв обоих проводов (для большей надежности действия) в непосредственной близости от источника тока, как это показано на рис. 24.

Увеличение тока при коротком замыкании подтверждается законом Ома:

$$I_{кз} = \frac{E}{R_{кз} + R_0},$$

где $R_{кз}$ — сопротивление внешней цепи (фактически очень малое сопротивление закороченных проводов);

R_0 — внутреннее сопротивление источника;

$I_{кз}$ — ток короткого замыкания.

Из формулы следует, что вследствие малой величины полного сопротивления цепи ($R_{кз} + R_0$) ток короткого замыкания получается очень большим (в несколько раз больше номинального тока источника).

Некоторые источники такие, как гальванические элементы и некоторые типы аккумуляторов, имеют сравнительно большое внутреннее сопротивление, поэтому у них ток короткого замыкания получается не очень большой и менее опасный для их целостности (речь идет о кратковременном токе короткого замыкания).

При коротком замыкании вольтметр показывает напряжение, практически равное нулю. Это подтверждается следствием из закона Ома:

$$U = I_{кз} R_{кз},$$

т. е. чем меньше $R_{кз}$, тем меньше и произведение $I_{кз} R_{кз}$. Физически это означает, что при коротком замыкании внешняя цепь обладает настолько малым сопротивлением, что единичные заряды почти не расходуют в ней энергии. Благодаря малому напряжению при коротком замыкании ток практически не идет в приемники.

Если пренебречь напряжением во внешней цепи, т. е. величиной $U = I_{кз} R_{кз}$, то на основании формулы $E = U + I R_0$ можно написать

$$E \approx I_{кз} R_0.$$

Следовательно, при коротком замыкании почти вся электродвижущая сила расходуется в самом источнике на преодоление его внутреннего сопротивления. Это и приводит к выделению большого количества тепла в источнике, а следовательно, и к выходу его из строя.

О последствиях короткого замыкания всегда нужно помнить и не допускать эксплуатации источника без плавких предохранителей в его электрической цепи. Для профилактики следует чаще проверять состояние изоляции всех токоведущих частей.

§ 24. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ СОБОЙ

Соединение приемника с источником (рис. 24) называется последовательным и является единственно возможным. Поэтому, когда говорят о соединении приемника с источником, то имеют в виду именно такое соединение.

Приемники же между собой могут соединяться последовательно, параллельно и смешанно. Такими же способами могут соединяться между собой и источники тока.

При одновременном питании нескольких приемников от источника очень важно знать так называемое эквивалентное сопротивление приемников. **Эквивалентным сопротивлением $R_{\text{эк}}$ называется сопротивление такого приемника, который, будучи присоединен к источнику вместо всех данных приемников, не изменяет потребляемой ими величины тока.** Как бы ни были соединены приемники между собой и какими бы сопротивлениями они ни обладали, всегда можно подобрать вместо них приемник с эквивалентным сопротивлением. Это можно подтвердить формулой (11)

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

определяющей величину сопротивления проводников (каждый приемник представляет собой прежде всего проводник тока).

В формуле (11) показано, что из данного материала, который характеризуется удельным сопротивлением, всегда можно изготовить проводник с любым по величине сопротивлением, изменив его длину l или площадь поперечного сечения S .

Зная величину эквивалентного сопротивления, можно заранее рассчитать номинальный ток источника, необходимый для питания данной группы приемника, по формуле

$$I = \frac{U}{R_{\text{эк}}},$$

где U — напряжение на зажимах источника;
 $R_{\text{эк}}$ — эквивалентное сопротивление приемников;
 I — ток, необходимый для питания приемников.

Питание приемников от данного источника будет возможно лишь в том случае, если полученный по формуле ток будет равен номинальному току источника либо меньше его.

Одна из наших задач и будет заключаться в том, чтобы для каждого способа соединения приемников получить формулу, по которой можно вычислить эквивалентное сопротивление.

Пусть от зажимов некоторого источника электрической энергии по двум проводам подано напряжение к группе приемников, соединенных последовательно (рис. 25). Последовательным называется такое соединение, при котором приемники включаются в цепь один за другим, или, как иногда говорят, когда вывод первого приемника соединяется с вводом второго, вывод второго — с вводом третьего и т. д.

Допустим, что приемники имеют различные сопротивления: R_1, R_2, \dots, R_n .

Установим особенности последовательного соединения на основании уже известных нам законов постоянного тока.

Первая особенность заключается в том, что величина тока во всех приемниках одинакова. Это следует из свойства простой электрической цепи. Следовательно, для измерения тока амперметр можно включать в любом месте цепи, и он везде будет давать одинаковые показания.

Вторая особенность соединения заключается в том, что падения напряжений на отдельных приемниках, т. е. величины $U_1 = IR_1, U_2 = IR_2, \dots, U_n = IR_n$, не равны между собой, так как по условию сопротивления приемников взяты разные. Падения напряжений на приемниках могут быть равны только в частном случае, когда сопротивления у них будут одинаковы.

Третья особенность состоит в том, что напряжение U , подаваемое от источника, всегда равно сумме падений напряжения в отдельных приемниках, т. е.

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n. \quad (27)$$

Физически это означает, что каждый единичный заряд полученную от источника энергию расходует по частям в отдельных приемниках соответственно величинам их сопротивлений.

На основании формулы $I = \frac{U}{R_{\text{эк}}}$ можно написать для напряжения источника

$$U = IR_{\text{эк}}.$$

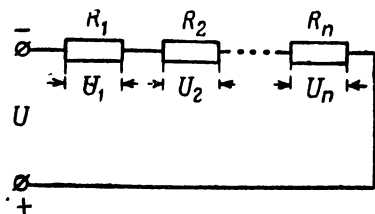


Рис. 25

Подставив значения падений напряжений в приемниках, а также только что полученное значение напряжения источников в формулу (27), получим

$$IR_{\text{эк}} = IR_1 + IR_2 + \dots + IR_n,$$

или после сокращения на I

$$R_{\text{эк}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (28)$$

Таким образом, при последовательном соединении приемников **эквивалентное сопротивление равно сумме их сопротивлений**. Физически это означает, что электрический ток в цепи поочередно проходит через все приемники и в каждом из них встречает сопротивление. Поэтому полное сопротивление току равно сумме сопротивлений отдельных приемников.

Из формулы (28) можно сделать вывод, что чем больше приемников включается последовательно во внешнюю цепь, тем больше становится ее эквивалентное сопротивление.

В частном случае, когда все приемники имеют одинаковые сопротивления R , формула (28) принимает вид

$$R_{\text{эк}} = nR,$$

где R — сопротивление одного приемника;

n — число последовательно соединенных приемников.

Последовательное соединение приемников применяют обычно в тех случаях, когда напряжение источника больше номинального напряжения приемника. Для поглощения излишнего напряжения последовательно с приемником включают еще один приемник

(например, реостат) определенного сопротивления (см. § 28).

Перейдем к параллельному соединению приемников (рис. 26). Возьмем опять приемники с разными сопротивлениями.

Параллельным соединением называется такое соединение, при котором все приемники имеют две общие точки. На рис. 26, а это мало заметно, но если те же приемники соединить так, как показано на рис. 26, б, то эти точки (A и B) будут явно выражены. Однако на практике такое соединение (рис. 26, б) не применяют,

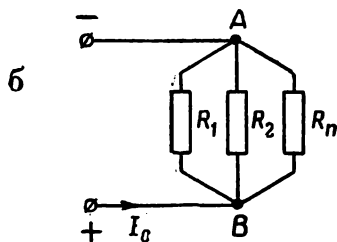
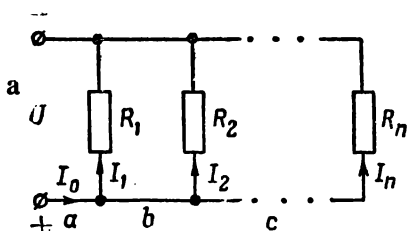


Рис. 26

так как если точки A и B считать зажимами источника, то от них к каждому приемнику нужно тянуть два провода.

Ценность второй схемы (рис. 26, б) в том, что по ней легко понять первую особенность параллельного соединения. Эта особенность заключается в том, что при параллельном соединении ко всем приемникам подводится одинаковое напряжение, подаваемое источником на общие точки A и B .

Если пренебречь падением напряжения в проводах, отделяющих приемники друг от друга (участки a , b и c), то в схеме, приведенной на рис. 26, а, приемники также получат одинаковое напряжение. При учете падения напряжения в проводах наибольшее напряжение получает первый приемник R_1 , ближе всех расположенный к зажимам источника, а наименьшее — самый дальний приемник R_n . Однако разница в напряжениях получается незначительной, не больше одного процента.

Цепи отдельных приемников, соединенных параллельно, называют также параллельными цепями или параллельными ветвями.

Вторая особенность параллельного соединения состоит в том, что величины токов в отдельных приемниках, т. е.

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad \dots; \quad I_n = \frac{U}{R_n},$$

неодинаковы вследствие различных сопротивлений приемников (по условию). В частном случае, когда сопротивления у приемников равны, токи в них также получаются одинаковыми.

Третья особенность параллельного соединения следует из первого правила Кирхгофа и заключается в том, что общая величина тока I_0 , потребляемая всеми приемниками, всегда равна сумме их отдельных токов.

Математически эту особенность можно выразить так:

$$I_0 = I_1 + I_2 + \dots + I_n. \quad (29)$$

Для получения формулы эквивалентного сопротивления можем написать для общего тока

$$I_0 = \frac{U}{R_{\text{эк}}}.$$

Подставив значения общего тока и токов приемников в формулу (29), получим

$$\frac{U}{R_{\text{эк}}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \dots + \frac{U}{R_n},$$

или после сокращения на U

$$\frac{1}{R_{\text{эк}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (30)$$

Следовательно, эквивалентная проводимость цепи при параллельном соединении приемников равна сумме проводимостей отдельных параллельных ветвей приемников. Физически это означает, что при параллельном соединении части общего тока проходят по отдельным приемникам и в каждом из них встречаются определенную проводимость, поэтому общая проводимость цепи для общего тока равна сумме проводимостей отдельных приемников.

Пример 2. Пусть $R_1 = 2 \text{ ом}$; $R_2 = 3 \text{ ом}$; $R_3 = 4 \text{ ом}$. Определим эквивалентное сопротивление.

Решение. По формуле (30)

$$\frac{1}{R_{\text{эк}}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \left[\frac{1}{\text{ом}} \right].$$

Приведя дроби к общему знаменателю, получим

$$\frac{1}{R_{\text{эк}}} = \frac{6 + 4 + 3}{12} = \frac{13}{12} \left[\frac{1}{\text{ом}} \right],$$

отсюда

$$R_{\text{эк}} = \frac{12}{13} \text{ ом}.$$

Эквивалентное сопротивление оказалось меньше самого малого из трех взятых нами сопротивлений. Так получается всегда потому, что каждый новый приемник, присоединяемый параллельно уже имеющемуся приемнику, как бы увеличивает его поперечное сечение, вследствие чего суммарное сопротивление приемника согласно формуле $R = \rho \frac{l}{S}$ уменьшается.

Отсюда можно сделать вывод, что чем больше приемников включается параллельно во внешней цепи, тем меньше становится ее эквивалентное сопротивление.

В частном случае, когда все приемники имеют одинаковое сопротивление, формула (30) принимает вид

$$\frac{1}{R_{\text{эк}}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \dots + \frac{1}{R} = \frac{n}{R}.$$

Отсюда

$$R_{\text{эк}} = \frac{R}{n},$$

где R — сопротивление одного приемника;

n — число параллельно соединенных приемников.

Для двух параллельно соединенных приемников с разными сопротивлениями

$$\frac{1}{R_{\text{эк}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2},$$

отсюда

$$R_{\text{эк}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

При большем количестве приемников формулы для эквивалентного сопротивления получаются сложными, поэтому удобнее пользоваться формулой (30).

Между токами и сопротивлениями параллельных ветвей существует обратно пропорциональная зависимость. Действительно, для токов любых двух параллельных ветвей, приведенных на рис. 26, можно написать так:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \text{ и } I_2 = \frac{U}{R_2}.$$

Разделив одно равенство на другое, получим

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (31)$$

Этой зависимостью часто пользуются при решении практических задач.

Параллельное соединение имеет преимущества перед последовательным соединением. При параллельном соединении приемники питаются от источника независимо один от другого, поэтому при отключении одного из них другие продолжают получать энергию. При последовательном же соединении с отключением одного из приемников питание всех остальных приемников прекращается.

Второе преимущество состоит в том, что при параллельном включении для питания приемников требуется гораздо меньшее напряжение, чем при последовательном соединении. Так, например, для питания 10 ламп, рассчитанных на напряжение 120 в, при последовательном их соединении требуется 1200 в согласно формуле (27), а при параллельном — всего 120 в. Высокое напряжение, во-первых, более опасно для жизни человека, а во-вторых, удорожает электрическую проводку, так как приходится ставить провода с повышенным качеством изоляции.

Из-за отмеченных преимуществ на практике приемники чаще всего соединяют параллельно при условии, конечно, что напряжение источника соответствует номинальным напряжениям приемников.

Рассмотрим теперь смешанное соединение. Оно представляет собой различные комбинации первых двух соединений. Таких комбинаций может быть бесчисленное множество, поэтому общей формулы для определения эквивалентного сопротивления при смешанном соединении нет. В таких цепях выделяют отдельные участки последовательно или параллельно соединенных приемников, и к этим участкам применяют ранее полученные формулы эквивалентного сопротивления.

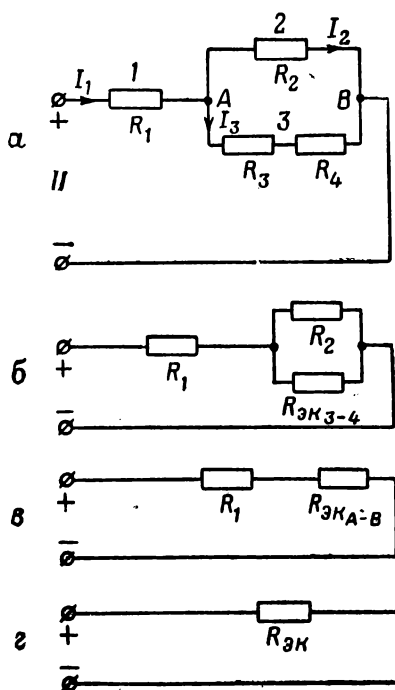


Рис. 27

Для примера определим эквивалентное сопротивление цепи, изображенной на рис. 27, а. Сначала применим формулу эквивалентного сопротивления для последовательного соединения простых, неразветвленных участков цепи. Затем применим формулу эквивалентного сопротивления для параллельного соединения.

В нашем случае (рис. 27, а) в цепи имеется три неразветвленных участка 1, 2 и 3. Участок 3 состоит из двух последовательно соединенных приемников с сопротивлениями R_3 и R_4 . Эквивалентное сопротивление этих приемников выражается формулой

$$R_{\text{экз-4}} = R_3 + R_4.$$

Найдя сопротивление $R_{\text{экз-4}}$, мы можем упростить нашу схему (рис. 27, б).

Второй и третий участки соединены параллельно между точками А и В. Эквивалентное сопротивление этих участков

$$R_{\text{экз А-В}} = \frac{R_2 R_{\text{экз-4}}}{R_2 + R_{\text{экз-4}}}.$$

Опять можно упростить схему (рис. 27, в). К полученной схеме применим формулу

$$R_{\text{эк}} = R_1 + R_{\text{экз А-В}}.$$

Это и будет эквивалентное сопротивление цепи, которую можно изобразить теперь так, как показано на рис. 27, г.

Пример 3. Дано (рис. 27, а): $R_1 = 10 \text{ ом}$; $R_2 = 5 \text{ ом}$; $R_3 = 2 \text{ ом}$; $R_4 = 3 \text{ ом}$; $U = 125 \text{ в}$. Определить величину тока I_1 .

Решение. 1) $R_{\text{экз-4}} = 2 + 3 = 5 \text{ ом}$;

$$2) R_{\text{экз А-В}} = \frac{5 \cdot 5}{5 + 5} = \frac{25}{10} = 2,5 \text{ ом};$$

$$3) R_{\text{эк}} = 10 + 2,5 = 12,5 \text{ ом};$$

$$4) I_1 = \frac{125}{12,5} = 10 \text{ а}.$$

Предлагается самостоятельно определить величины токов I_2 и I_3 .

§ 25. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Сопротивление приемника можно вычислять по формуле $R = \rho \frac{l}{S}$ лишь в том случае, если известны его геометрические размеры. В тех же случаях, когда размеры неизвестны и их нельзя установить, сопротивление приемника измеряют.

Простейшим способом измерения сопротивлений является так называемый абсолютный способ, или способ амперметра и вольтметра. Этот способ основан на формуле $R = \frac{U}{I}$. Из формулы видно, что для измерения сопротивления любого приемника нужно знать величину тока, проходящего по приемнику, и напряжение, которое на нем расходуется.

Для измерения указанных величин можно применить две схемы (рис. 28). По схеме, приведенной на рис. 28, а, вольтметр измеряет напряжение приемника с неизвестным сопротивлением R_x , амперметр же измеряет сумму токов, т. е.

$$I_n + I_v,$$

где I_n — величина тока в приемнике;

I_v — величина тока в вольтметре.

Следовательно, если пользоваться схемой (рис. 28, а) и вычислять сопротивление приемника по формуле $R_x = \frac{U}{I_n + I_v}$, то сопротивление получится меньше истинного за счет тока вольтметра, проходящего через амперметр.

При измерении очень малых сопротивлений (в десятки доли ома и менее) ток вольтметра получается настолько незначительным по сравнению с током приемников, что им можно пренебречь.

По схеме (рис. 28, б), наоборот, амперметр измеряет ток приемника с неизвестным сопротивлением, а вольтметр — сумму падений напряжения, т. е.

$$U_n + U_A,$$

где U_n — падение напряжения в приемнике;

U_A — падение напряжения в амперметре.

Следовательно, если пользоваться схемой (рис. 28, б) и вычислять сопротивление по формуле $R_x = \frac{U_n + U_A}{I}$, то сопротивление получится больше истинного за счет измеряемого вольтметром падения напряжения в амперметре.

При измерении очень больших сопротивлений (в десятки ом и больше) падение напряжения в амперметре получается настолько незначительным по сравнению с падением напряжения в приемниках, что им можно пренебречь.

Таким образом, абсолютный способ является приближенным. При измерении этим способом малых сопротивлений следует пользоваться схемой, изображенной на рис. 28, а, а при измерении больших сопротивлений — схемой, приведенной на рис. 28, б.

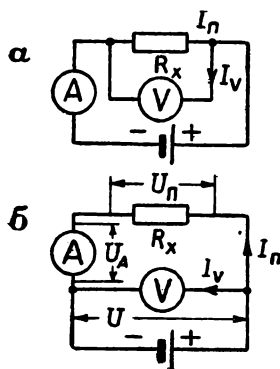


Рис. 28

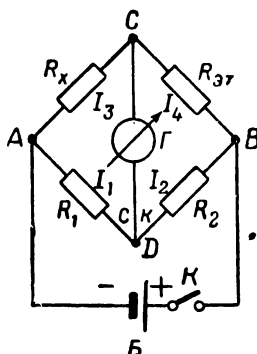


Рис. 29

В тех случаях, когда сопротивление приемника нужно измерить более точно, прибегают к особой схеме (рис. 29), называемой схемой моста. В этой схеме:

- R_x — измеряемое сопротивление;
- R_{37} — эталонное, т. е. точно измеренное и заранее известное сопротивление;
- R_1 и R_2 — сопротивления участков калиброванной проволоки, т. е. проволоки, везде имеющей одинаковое поперечное сечение;
- $СК$ — скользящий контакт, который можно передвигать по калиброванной проволоке;
- K — ключ (однополюсный рубильник) для замыкания цепи моста;
- $Б$ — источник тока, обычно гальванический элемент или аккумулятор с электродвижущей силой, не более 2 в;
- $Г$ — гальванометр, т. е. чувствительный амперметр, реагирующий на очень малые токи (гальванометр должен быть с двусторонним отклонением стрелки, т. е. иметь шкалу с нулем посередине).

Работа схемы моста основана на наличии точек одинакового потенциала в параллельных ветвях. Между такими точками не может быть тока, так как разность потенциалов U между ними равна нулю, а следовательно:

$$I = \frac{U}{R} = 0.$$

Схема моста работает следующим образом.

Пусть скользящий контакт $СК$ не касается калиброванной проволоки, а в параллельных ветвях ACB и ADB схемы моста при замкнутом ключе K проходят токи, соответствующие сопротивлениям этих ветвей.

При этом точке C верхней параллельной ветви ACB будет соответствовать определенный потенциал U_c . Точно такой же потенциал должен быть в некоторой точке D нижней параллельной ветви ADB . Обозначим этот потенциал через U_d .

Меняя положение контакта на калиброванной проволоке и замыкая на мгновение ключ K (долго цепь нельзя держать включенной, чтобы гальванометр не перегорел), добиваются того, чтобы ток через гальванометр не шел. В этом положении скользящий контакт касается точки D , имеющей одинаковый потенциал с точкой C ($U_c - U_d = 0$), поэтому и ток I_r , проходящий через гальванометр, равен нулю, т. е.

$$I_r = \frac{U_c - U_d}{R_r} = 0,$$

где R_r — сопротивление гальванометра.

Такое состояние электрической схемы моста называется состоянием равновесия между точками C и D , к которым присоединен гальванометр. В состоянии равновесия моста участок CD с гальванометром как бы отсутствует (так как тока в нем нет), поэтому токи I_1 и I_2 , а также токи I_3 и I_4 поучаются попарно равными:

$$I_1 = I_2 \text{ и } I_3 = I_4.$$

Далее падение напряжения на участке AC получается равным падению напряжения на участке AD , так как эти участки в точке A имеют один и тот же потенциал U_a , точки же C и D участков имеют одинаковые потенциалы ($U_c = U_d$). То же самое можно сказать и относительно участков BC и BD . Исходя из равенства падений напряжения на указанных участках, можем написать для них:

для участков AC и AD

$$I_3 R_x = I_1 R_1;$$

для участков BC и BD

$$I_4 R_{\text{эт}} = I_2 R_2.$$

Разделив одно равенство на другое, получим

$$\frac{I_3 R_x}{I_4 R_{\text{эт}}} = \frac{I_1 R_1}{I_2 R_2},$$

или

$$\frac{R_x}{R_{\text{эт}}} = \frac{R_1}{R_2}$$

(так как $I_1 = I_2$ и $I_3 = I_4$). Отсюда

$$R_x = R_{\text{эт}} \frac{R_1}{R_2}. \quad (32)$$

Сопротивление участков калиброванной проволоки R_1 и R_2 можно выразить так:

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S} \text{ и } R_2 = \rho \frac{l_2}{S},$$

где ρ — удельное сопротивление проволоки;
 l_1 и l_2 — длины ее участков.

Подставив значения сопротивлений участков в формулу (32), получим

$$R_x = R_{\text{эт}} \frac{l_1}{l_2}. \quad (33)$$

Это и есть рабочая формула для вычисления величин сопротивлений, измеряемых по схеме моста. Длины участков l_1 и l_2 калиброванной проволоки определяют по масштабной линейке.

Все детали схемы моста: эталонные сопротивления, калиброванная проволока со скользящим контактом, масштабная линейка, ключ K , зажимы A и C для подключения измеряемого сопротивления, гальванометра и источника электрической энергии — монтируются обычно на деревянном основании.

Эталонные сопротивления представляют собой сопротивления небольших катушек из тонкой изолированной манганиновой проволоки. Сопротивления катушек точно измерены и указаны против соответствующих гнезд ламелей (металлических пластинок), с помощью которых можно вводить то или другое сопротивление, если из гнезда этих ламелей вынуть соответствующий штепсель. Штепсель представляет собой конусный стержень, плотно входящий в гнездо ламелей.

При пользовании мостом особое внимание нужно обращать на надежность контактов в местах подключения соединительных проводов (гальванометра и измеряемого сопротивления), так как плохие контакты приводят к ошибкам при измерении сопротивлений.

Точность измерения сопротивлений мостом зависит от чувствительности гальванометра, а также от точности отсчетов длин участков калиброванной проволоки.

§ 26. ЭНЕРГИЯ, РАБОТА И МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Энергией тела, как известно, называется его способность совершать работу. Измерить энергию — значит измерить работу, которую совершает тело, расходуя энергию. Под работой тела следует понимать проявление им своей энергии.

Формы проявления энергии в каждом отдельном случае могут быть различны. Так, например, проявление энергии порохового заряда, или его работа, сводится к тому, что заряд действием своих пороховых газов выталкивает снаряд из канала ствола орудия и сообщает ему кинетическую энергию. Обладая энергией, снаряд в свою очередь совершает работу, разрушая оборонительные сооружения противника.

В практической системе единиц работа и энергия измеряются в одних и тех же единицах — джоулях. Объясняется это тем, что энергия измеряется обычно работой, которая совершается в результате затраты энергии. При таком способе измерения энергия и работа всегда получают численно равными по величине.

Электрическая энергия, как и всякий другой вид энергии, также проявляется только при совершении работы. До сих пор электрическую энергию мы относили к электронам (или к единичным зарядам), движущимся во внешней цепи под действием сил электрического поля. На практике принято считать, что энергией обладает электрический ток внешней цепи.

Обладая энергией, ток может совершать работу. В частности, работа тока сводится к преодолению сопротивления приемников. Электрическая энергия при этом превращается в тепловую. Для вычисления работы или энергии тока на любом участке внешней цепи можно пользоваться уже известной нам формулой

$$W = Q(U_1 - U_2),$$

где Q — количество электричества, проходящего по участку за некоторое время t ;

$U_1 - U_2$ — разность потенциалов на концах участка.

Зная, что количество электричества определяется формулой $Q = It$, а разность потенциалов есть не что иное, как напряжение на участке, мы можем формулу для вычисления работы или энергии тока написать в таком виде

$$W = UIt \text{ джоуль,} \quad (34)$$

где U — напряжение на участке в вольтах;

I — величина тока, проходящего по участку, в амперах;

t — время прохождения тока в секундах.

Это — основная формула для вычисления энергии и работы электрического тока.

Работа, совершаемая током в секунду, называется мощностью и обозначается буквой P . Мощностью тока характеризуется интенсивность совершаемой им работы. Для вывода формулы мощности достаточно правую и левую части формулы (34) разделить на время t :

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

После сокращения на t получим

$$P = UI. \quad (35)$$

Единицей измерения мощности служит ватт ($вт$). Ватт — это мощность, при которой за секунду равномерно производится работа в один джоуль.

Исходя из формулы мощности, мы можем формулу (34) написать и так:

$$W = Pt \text{ джоуль.}$$

В соответствии с единицами измерения мощности и времени джоуль называют также ватт-секундой. Если в последней формуле время взять в часах, то получится новая единица, называемая ватт-часом. Один ватт-час равен 3600 ватт-секундам.

Более крупные единицы измерения энергии и мощности приведены в табл. 5.

Таблица 5

Единицы измерения энергии и мощности

Единицы энергии	Гектоватт-час ($гвт-ч$) = 100 ватт-часов ($вт-ч$) Киловатт-час ($квт-ч$) = 1000 $вт-ч$ Мегаватт-час ($мгвт-ч$) = 1000 000 $вт-ч$
Единицы мощности	Гектоватт ($гвт$) = 100 ватт ($вт$) Киловатт ($квт$) = 1000 $вт$ Мегаватт ($мгвт$) = 1 000 000 $вт$

Иногда на практике пользуются старыми единицами измерения механической мощности и работы — лошадиной силой ($л. с.$) и килограммометром ($кгм$). Лошадиная сила численно равна работе в 75 $кгм$, совершаемой в секунду.

Между старыми и новыми единицами существуют соотношения: 1 $кгм$ = 9,81 джоуля; 1 $л. с.$ = $75 \cdot 9,81 = 736 \text{ дж/сек} = 736 \text{ вт}$.

Для вычисления мощности электрического тока можно получить еще две формулы. Для этого достаточно в формулу $P = UI$ подставить значения тока I и напряжения U , определяемые из следствия закона Ома:

$$I = \frac{U}{R} \text{ и } U = IR.$$

После подстановки получим

$$P = I^2 R \text{ ватт и } P = \frac{U^2}{R} \text{ ватт.}$$

Эти формулы равноценны, и к ним прибегают при решении задач в зависимости от того, какие из величин известны.

Энергия и мощность тока расходуются в приемниках, включенных во внешнюю цепь, поэтому формулы (34) и (35) фактически используются для определения энергии и мощности, потребляемых приемниками.

Каждый приемник электрической энергии характеризуется не только номинальным напряжением, но и номинальной мощностью, потребляемой им для своей нормальной работы. Эти величины всегда указываются на приемниках. У электрических ламп, например, они указываются на стеклянных баллонах. Лампы по мощности и по напряжению бывают разные. Номинальная величина тока у лампы обычно не указывается, так как ее можно легко определить по мощности и напряжению, пользуясь формулой

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

Мощность, отдаваемая источником во внешнюю цепь, называется его полезной мощностью. Часть этой мощности (не более 3—4%) неизбежно расходуется в соединительных проводах, а остальная, большая часть, идет на питание приемников.

Для вычисления полезной мощности источника можно пользоваться уже полученными нами формулами

$$P = UI, \quad P = I^2 R \quad \text{и} \quad P = \frac{U^2}{R},$$

где I — полный ток источника во внешней цепи в амперах;

U — напряжение на зажимах источника в вольтах;

R — эквивалентное сопротивление внешней цепи в омах.

Полезная мощность, получаемая при номинальном токе, называется номинальной мощностью источника. Полезная мощность составляет большую часть полной, или электрической ($P_{эл}$), мощности источника. В полную мощность входит и мощность, которая расходуется в самом источнике на преодоление его собственного сопротивления.

Для вывода формулы полной мощности воспользуемся законом Ома.

$$E = IR + IR_0.$$

Умножив обе части равенства на величину тока, получим

$$EI = I^2 R + I^2 R_0.$$

В этой формуле $I^2 R = P$ — полезная мощность источника, $I^2 R_0 = P_0$ — мощность, расходуемая в самом источнике, а сумма этих мощностей $EI = P_{эл}$ — полная, или электрическая, мощность источника.

Отношение полезной мощности к электрической называется

электрическим коэффициентом полезного действия источника, поэтому можно написать

$$\eta_{эл} = \frac{P}{P_{эл}} \cdot 100 = \frac{UI}{EI} \cdot 100 = \frac{I^2 R}{I^2 R + I^2 R_0} \cdot 100.$$

После сокращения на I^2 получим

$$\eta_{эл} = \frac{R}{R + R_0} \cdot 100. \quad (36)$$

Доказано, что при равенстве сопротивлений внутреннего и внешнего участков электрической цепи (т. е. когда $R = R_0$) источник тока отдает наибольшую полезную мощность.

Пример 4. Источник с электродвижущей силой в 2 в обладает внутренним сопротивлением R_0 в 1 ом. Определить полезные мощности источника при поочередном подключении к его зажимам приемников с сопротивлениями $R_1 = 0,5$ ом; $R_2 = 1$ ом; $R_3 = 3$ ом.

Решение. 1. Для первого приемника

$$I_1 = \frac{2}{0,5 + 1} = 1,33 \text{ а;}$$

$$P_1 = I_1^2 R_1 = 1,33^2 \cdot 0,5 = 0,885 \text{ вт.}$$

2. Для второго приемника

$$I_2 = \frac{2}{1 + 1} = 1 \text{ а;}$$

$$P_2 = I_2^2 \cdot 1 = 1 \text{ вт.}$$

3. Для третьего приемника

$$I_3 = \frac{2}{1 + 3} = 0,5 \text{ а;}$$

$$P_3 = 0,5^2 \cdot 3 = 0,75 \text{ вт.}$$

Результаты решения подтверждают, что максимальная мощность источника получается во втором варианте, т. е. при равенстве сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи.

Как следует из формулы (36), при максимальной полезной мощности источника его к. п. д. составляет всего 50% (мощность расходуется поровну на обоих участках цепи).

§ 27. ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА И ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА

Тепловым действием электрического тока называется его способность нагревать приемник электрической энергии. Физические процессы, протекающие при нагревании приемника, уже рассматривались в § 18.

Изучая тепловое действие электрического тока, русский ученый Э. Х. Ленц и английский ученый Джоуль, независимо один от другого, установили, что между током и количеством

выделяемого им тепла в приемнике существует определенная зависимость. Эта зависимость, известная в электротехнике под названием закона Джоуля — Ленца, математически выражается формулой

$$Q = 0,24 I^2 R t \text{ малых калорий,} \quad (37)$$

где I — величина тока в приемнике в амперах;

R — сопротивление приемника в омах;

t — время прохождения тока в секундах;

0,24 — термический эквивалент, означающий, что один джоуль электрической энергии эквивалентен 0,24 м. кал тепловой энергии.

Как видим, в формуле произведение $I^2 R t$ определяет количество электрической энергии, потребляемой приемником, а термический эквивалент лишь перечисляет эту энергию в тепловую.

Закон Джоуля — Ленца позволяет вычислять тепловую энергию, выделяемую током, и по другим формулам:

$$Q = 0,24 W, \text{ так как } I^2 R t = W;$$

$$Q = 0,24 P t, \text{ так как } I^2 R = P;$$

$$Q = 0,24 \frac{U^2}{R} t, \text{ так как } \frac{U^2}{R} = I^2 R.$$

Все эти выражения равноценны с формулой (37).

Тепловое действие тока находит большое практическое применение. Не рассматривая подробно многочисленные приемники, использующие тепловое действие тока, остановимся лишь на плавких предохранителях — обязательном элементе каждой электрической цепи.

Как уже говорилось в § 23, основное назначение плавких предохранителей заключается в защите соединительных проводов и источника от последствий короткого замыкания. Теперь можно добавить, что предохранители, кроме того, предупреждают перегрев проводов и источников токами, на которые они не рассчитаны.

Предохранители должны пропускать ток, на который рассчитаны провода и источники, и перегорать, когда величина тока превышает расчетную на 20—30%. При коротком замыкании предохранители должны перегорать мгновенно, т. е. в течение долей секунды. Чем больше ток короткого замыкания по сравнению с номинальным током, тем быстрее перегорают предохранители.

Главной частью предохранителя независимо от его устройства является плавкая вставка — короткая проволока из легкоплавкого металла (чаще всего свинца). Плавкая вставка либо самостоятельно включается в разрыв цепи с помощью припаянных к ней наконечников (рис. 30, а), либо закреп-

ляется в той или иной оправе для удобства пользования ею. В зависимости от устройства оправы предохранители бывают пробочные, трубчатые и стержневые.

Устройство пробочного предохранителя, применяемого в осветительных сетях, показано в разрезе на рис. 30, б. Предохранитель состоит из фарфорового основания в виде пробки (отсюда и название самого предохранителя), имеющего сквозной цилиндрический канал. Снаружи нижняя часть основания имеет винтовую поверхность, на которую навинчено контактное металлическое кольцо. В нижней части канала укреплен металлический контакт К. Плавкая вставка проходит через боковое отверстие основания и припаявается концами к наружному кольцу и контакту. Для включения в цепь предохранитель ввинчивается в особый патрон, который винтовыми зажимами присоединяется к токоведущему проводу в разрыве цепи (последовательно).

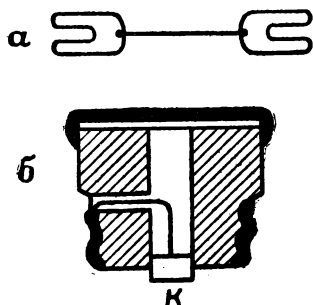


Рис. 30

У трубчатого предохранителя оправой служит стеклянная трубка, имеющая на концах металлические колпачки. Плавкая вставка помещается внутри трубки; концы вставки припаяны к колпачкам.

Стержневой предохранитель отличается от трубчатого тем, что у него вместо трубки имеется стержень из эбонита или из другого изоляционного материала, а плавкая вставка припаяна к колпачкам снаружи. Как трубчатый, так и стержневой предохранители включаются в разрыв цепи с помощью пружинных зажимов, которые присоединяются к концам проводов.

В цепях с большими токами применяются пластинчатые и трубчатые предохранители.

Пластинчатый предохранитель по устройству не отличается от предохранителя, изображенного на рис. 30, а, и изготавливается на токи до 200 а. Предохранитель удерживается контактными зажимами цепи, монтируемыми обычно на шиферной плите.

Для защиты обслуживающего персонала от брызг металла в случае перегорания плавкой вставки предохранители обязательно закрывают кожухом.

Трубчатые предохранители отличаются от описанной выше конструкции тем, что у них плавкая вставка (цинковая) помещается внутри фибровой трубки. Концы плавкой вставки прикреплены к контактными наконечникам, которые плотно (герметически) вставлены с обеих сторон в трубку. Наконечники заканчиваются плоскими ножами и с помощью их встав-

ляются в пружинящие контакты цепи. В момент перегорания вставки небольшая часть фибры под действием высокой температуры переходит в газообразное состояние. Благодаря возникающему давлению газов в трубке (до 100 атмосфер) электрическая дуга быстро гаснет и таким образом отключает поврежденную цепь от источника. Для большей механической прочности на концы фибровой трубки снаружи надеты латунные обоймы в виде колец.

Предохранители описанного типа (серии ПР-1) выполняются на токи до 1000 *a*.

Независимо от устройства каждый предохранитель характеризуется тремя токами: номинальным I , рабочим I_p и максимальным I_m . Номинальным током называется такой ток, при котором предохранитель не нагревается выше 50°С. Ниже приведена табл. 6 номинальных токов предохранителей, применяемых для защиты медных проводов.

Таблица 6

Допустимая нагрузка на изолированные медные провода

Поперечное сечение провода, мм ²	Наибольшая допустимая продолжительная величина тока, <i>a</i>	Номинальная величина тока плавких предохранителей, <i>a</i>
0,5	7,5	6,0
0,75	9,0	6,0
1,0	11,0	6,0
1,5	14,0	10,0
2,5	20,0	15,0
4,0	25,0	20,0
6,0	31,0	25,0
10,0	43,0	35,0
16,0	75,0	60,0
25,0	100,0	80,0

Под рабочим током предохранителя следует понимать наибольший ток, который могут длительно выдерживать провода или источник. Так, для защиты провода с поперечным сечением в 2,5 мм² нужно поставить предохранитель с номинальным током в 15 *a*. Наибольший продолжительный ток, допустимый для данного провода, равен 20 *a*. Этот ток и будет для предохранителя рабочим током. При рабочем токе допускается нагрев предохранителя до 100° и выше, т. е. предохранитель работает, как говорят, на пределе. Поэтому даже при кратковременных небольших перегрузках, например при токах на 20—30 % больше рабочего в течение 20—30 минут, он перегорает, не допуская дальнейшего перегрева проводов.

Максимальным током предохранителя называется ток, при котором предохранитель мгновенно перегорает. Между максимальным и рабочим токами существует зависимость

$$I_m = (1,2 \div 1,3) I_p.$$

Постоянные коэффициенты 1,2 и 1,3 берут в зависимости от поперечного сечения предохранителя. Чем больше поперечное сечение, тем больше наружная поверхность предохранителя и тем лучше от него отводится тепло окружающим воздухом, поэтому тем больше максимальный ток, при котором предохранитель перегорает. Следовательно, для малых сечений нужно брать коэффициент 1,2, а для больших 1,3.

Готовые предохранители или вставки к ним подбирают в соответствии с данными табл. 6.

§ 28. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Ползунковый реостат применяется при лабораторных работах, когда необходимо изменять величину тока во внешней цепи либо нужно погасить излишнее напряжение источника, чтобы к приемнику подводилось номинальное напряжение. В обоих случаях реостат необходимо рассчитать, т. е. установить сопротивление реостата и ток, который он должен выдерживать.

Пусть, например, к зажимам некоторого источника, поддерживающего напряжение в 220 в, подключен приемник с сопротивлением $R_{пр}$, потребляющий номинальный ток в 0,5 а. Необходимо последовательно с приемником включить реостат с сопротивлением R_p , который давал бы возможность изменить величину тока приемника в пределах 0,1—0,5 а.

В целях большей надежности работы реостата его нужно рассчитывать на номинальный ток приемника. Для определения величины сопротивления реостата воспользуемся формулой

$$R_{эк} = R_{пр} + R_p,$$

где $R_{пр}$ — сопротивление приемника;
 R_p — сопротивление реостата;
 $R_{эк}$ — эквивалентное сопротивление реостата и приемника при токе в цепи в 0,1 а.

Из этой формулы найдем

$$R_p = R_{эк} - R_{пр}.$$

Эквивалентное сопротивление цепи и сопротивление приемника определяются формулами

$$R_{эк} = \frac{U_{ист}}{0,1} \text{ и } R_{пр} = \frac{U_{ист}}{0,5},$$

где $U_{ист}$ — напряжение источника;
 0,1 и 0,5 — крайние пределы тока в цепи.

Подставив значение напряжения источника в последние формулы, получим

$$R_{\text{эк}} = \frac{220}{0,1} = 2200 \text{ ом}; R_{\text{пр}} = \frac{220}{0,5} = 440 \text{ ом}.$$

Зная эквивалентное сопротивление и сопротивление приемника, определяем сопротивление реостата

$$R_p = R_{\text{эк}} - R_{\text{пр}} = 2200 - 440 = 1760 \text{ ом}.$$

Таким образом, для удовлетворения условия задачи реостат нужно взять сопротивлением в 1760 ом и на ток в 0,5 а.

Теперь изменим несколько условие задачи: будем считать, что приемник рассчитан на номинальное напряжение в 120 в и на номинальный ток в 0,1 а.

Включать данный приемник на 220 в нельзя, так как он перегорит от большого тока. Необходимо подобрать реостат, который можно было бы включить последовательно с приемником, чтобы обеспечить номинальное напряжение и погасить излишнее напряжение источника.

По условию задачи реостат нужно взять на ток в 0,1 а.

Величина сопротивления реостата определится формулой

$$R_p = \frac{U_p}{I},$$

где U_p — падение напряжения в реостате;
 I — величина тока в цепи.

Для определения падения напряжения в реостате воспользуемся формулой

$$U_{\text{ист}} = U_{\text{пр}} + U_p,$$

где $U_{\text{пр}}$ — номинальное напряжение приемника;
 U_p — падение напряжения в реостате.

Из этой формулы найдем

$$U_p = U_{\text{ист}} - U_{\text{пр}}.$$

Подставив значения напряжений источника и приемника в формулу, получим

$$U_p = 220 - 120 = 100 \text{ в}.$$

Это и есть излишнее напряжение источника, которое необходимо погасить в реостате. Зная падение напряжения в реостате, определим его сопротивление

$$R_p = \frac{100}{0,1} = 1000 \text{ ом}.$$

Таким образом, чтобы приемник получал номинальное напряжение, необходимо взять реостат с сопротивлением в 1000 ом и на ток в 0,1 а.

В технике слабых токов номинальная величина тока приемников исчисляется миллиамперами (*ма*), поэтому сопротивления реостатов получаются очень большими. Так, если в рассмотренном нами примере номинальный ток приемника равен 0,001 а (т. е. 1 *ма*), то сопротивление реостата

$$R_p = \frac{100}{0,001} = 100\,000 \text{ ом.}$$

Изготавливать проволочные реостаты с таким большим сопротивлением нерационально, так как они дороги и громоздки, поэтому в радиотехнических устройствах применяют проволочные реостаты с сопротивлением не выше 50 000 ом.

Сопротивления, используемые в радиотехнике, делят на переменные и постоянные по величине. Переменное сопротивление представляет собой ползунковый реостат с цилиндрическим или чаще кольцевым основанием (рис. 31).

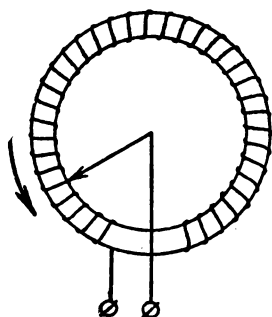


Рис. 31

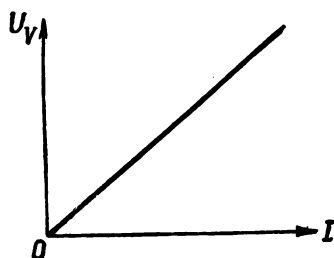
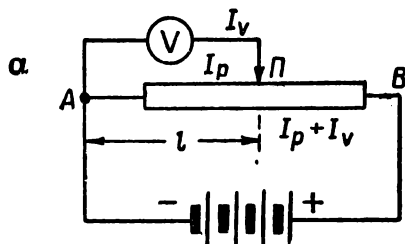


Рис. 32

Постоянные проволочные сопротивления навиваются на керамическую трубку и покрываются слоем эмали. Концы проволоки выведены для включения сопротивления в цепь. Такие сопротивления используются только для гашения напряжения.

Достоинство проволочных сопротивлений заключается в их надежности и стабильности, т. е. в независимости величины сопротивлений от других факторов, кроме температуры.

Наряду с проволочными сопротивлениями в радиотехнике широко используются непроволочные сопротивления величиной от 10 до $+10^7$ ом. В настоящее время нашей промышленностью выпускаются непроволочные сопротивления только типа ВС, наиболее надежные в работе.

Эти сопротивления состоят из фарфорового стержня или трубочки, покрытых сверху тонким слоем проводящего углерода. Концы сопротивлений имеют контактные металлические выводы (пояски). Проводящий слой углерода сверху покрыт изолирующим влагостойким лаком. Величина сопротивлений при температуре от -60 до 70°C изменяется незначительно. Сопротивления изготавливаются на мощности $0,25-10 \text{ вт}$. Числовое значение сопротивлений указывается на них цифрами, причем тысячи и миллионы ом соответственно обозначаются буквами *к* и *м*.

В тех случаях, когда напряжение на зажимах приемника необходимо плавно изменять от нуля до номинального значения, применяют особые приборы, называемые потенциометрами.

В качестве потенциометра может быть использован обычный ползунковый реостат, включаемый по схеме, изображенной на рис. 32, *а*. Из схемы видно, что в зависимости от положения ползунка *П* реостата вольтметр как приемник получает различные напряжения от нуля (при крайнем левом положении ползунка) до наибольшего, равного напряжению источника (при крайнем правом положении ползунка).

Если пренебречь током, проходящим по вольтметру, то напряжение, показываемое вольтметром при любом положении ползунка, можно подсчитать по формуле

$$U_v = I_p R,$$

где I_p — величина тока, проходящего по реостату (ее можно считать постоянной, если пренебрегать током вольтметра);

R — сопротивление участка реостата между зажимом *А* и ползунком.

При одинаковом поперечном сечении основания реостата (т. е. фарфоровой трубки) его сопротивление на каждый сантиметр длины будет одинаково. Если обозначить это сопротивление через r , то сопротивление любого участка реостата от зажима *А* до ползунка можно выразить так:

$$R = rl.$$

Подставив значение R в формулу $U_v = I_p R$, получим

$$U_v = I_p rl.$$

Из этого равенства следует, что напряжение на любом участке при неизменном токе в реостате прямо пропорционально расстоянию l ползунка от зажима *А*. Зависимость $U_v = I_p rl$ изображается графически прямой линией (рис. 32, *б*). Поэтому потенциометр, имеющий одинаковое поперечное сечение основания, называется линейным.

Если поперечное сечение основания потенциометра сделать переменным, например таким, как показано на рис. 33, а, то график зависимости между U и l получится иной (рис. 33, б). Потенциометр с такой зависимостью называется функциональным.

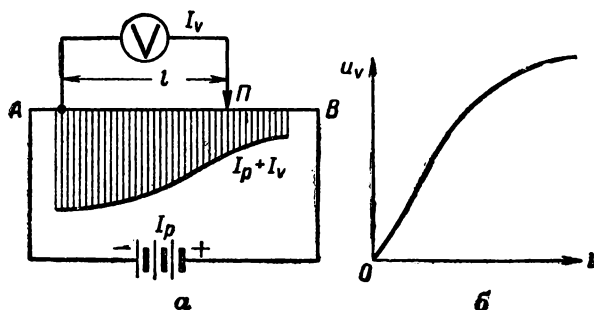


Рис. 33

Рассмотренные нами потенциометры дают возможность изменять лишь величину напряжения, не изменяя его знака, т. е. направления. Для того чтобы можно было изменять и знак напряжения, применяют потенциометры со средней точкой c (рис. 34), от которой ползунок может перемещаться в обе стороны.

Примем точку c за точку с нулевым потенциалом ($U_c = 0$) и напомним выражения для разностей потенциалов на участках ac и cd . Потенциал в точке a надо считать отрицательным (см. § 9), поэтому на участке ac для разности потенциалов можно написать

$$U_{ac} = -U_a - U_c.$$

Но $U_c = 0$, следовательно:

$$U_{ac} = -U_a.$$

Потенциал в точке d , наоборот, положительный, поэтому разность потенциалов на участке dc

$$U_{dc} = U_d - U_c = +U_d.$$

Различные знаки разностей потенциалов на участках подтверждают, что схема, действительно, позволяет изменять и знак напряжения, а следовательно, и направление тока в приемнике (в данном случае в вольтметре). В изменении направления тока можно убедиться непосредственно по схеме. При левом положении ползунка ток в приемник поступает через точку c , следовательно, имеет одно направление. При правом положении ползунка ток в приемник поступает через ползунок, поэтому его направление изменяется на противоположное.

Из схем, изображенных на рис. 32, 33 и 34, видно, что по свободным участкам потенциометров, т. е. по участкам, к которым не подключен параллельно вольтметр, проходит сумма токов самого потенциометра и вольтметра. Наибольший ток в потенциометре получается на участке, заключенном между ползуном и зажимом, когда ползунок близко подходит к этому зажиму (рис. 34, зажим А). При таком положении ползунка ток в приемнике приближается к наибольшему своему значению (так как приемник получает наибольшее напряжение), поэтому и сумма токов на указанном участке получается наибольшей.

Проволока для потенциометра должна быть взята такого сечения, чтобы допустимый для нее ток был равен сумме токов на опасном участке или был больше этой суммы.

Потенциометры имеют большое применение в радиотехнике, а также в счетно-решающих электрических приборах, т. е. приборах, которые позволяют производить арифметические действия (умножение и деление). Так, если в линейном потенциометре величину тока, проходящего по проволоке, и расстояние l от ползунка до зажима А принять в некотором масштабе за две какие-либо величины, то вольтметр по формуле $U_v = I_p r l$ будет показывать в соответствующем масштабе произведение этих величин.

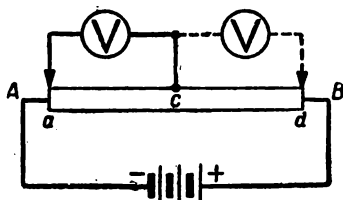


Рис. 34

§ 29. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ЗАРЯДЕ И РАЗРЯДЕ КОНДЕНСАТОРА

К приемникам электрической энергии относятся и конденсаторы, которые широко применяются на практике, главным образом в радиотехнических установках.

Однако конденсатор является своеобразным приемником. Своеобразие его заключается в том, что он заряжается (т. е. его пластины электризуются), будучи включенным в цепь постоянного тока, причем остается заряженным после отключения от цепи и, следовательно, может быть использован как источник мгновенного тока при разряде на внешнюю цепь.

Заряд и разряд являются основными режимами работы конденсаторов в электрических цепях, поэтому рассмотрим более подробно физические процессы, происходящие при этих режимах.

Пусть к источнику постоянного тока, поддерживающему на своих зажимах напряжение в U вольт, подключается конденсатор емкостью в C фарад и последовательно с ним приемник (например, реостат) сопротивлением в R ом (рис. 35).

Сразу же после включения рубильника P_1 электроны начинают двигаться под действием электрического поля источника в сторону пластины A конденсатора, поэтому на ней появляется отрицательный заряд. Вследствие явления электростатической индукции заряд пластины A возбуждает на пластине B два противоположных заряда, из которых каждый равен ему по величине. Положительный заряд остается на пластине B (как связанный с ядрами атомов), а отрицательный

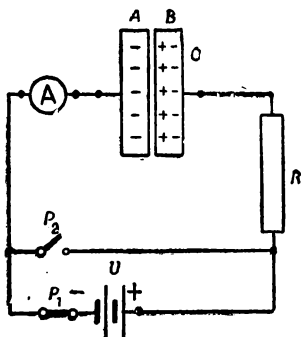


Рис. 35

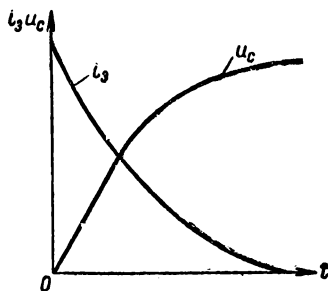


Рис. 36

начинает двигаться в сторону положительного зажима источника, причем одновременно с появлением отрицательного заряда на пластине A . Поэтому после включения рубильника P_1 в цепи возникает электрический ток по обе стороны от пластин конденсатора.

С появлением зарядов на пластинах конденсатора в нем создается собственное электрическое поле, а следовательно, и разность потенциалов или собственное напряжение (U_c) на пластинах. По мере прохождения тока в цепи величина зарядов на пластинах увеличивается, поэтому увеличивается и собственное напряжение конденсатора, так как источнику приходится расходовать все больше энергии для перемещения электронов на пластину A (силы отталкивания отрицательного заряда пластины возрастают). Ток в цепи прекращается, а заряд конденсатора заканчивается, когда силы отталкивания электронов от пластины A ее зарядом становятся равными силам электрического поля источника, перемещающим электроны на эту пластину.

Очевидно, что по окончании заряда и собственное напряжение конденсатора становится равным напряжению на зажимах источника тока, так как источник не может сообщить единичным зарядам энергию, которая превышала бы его напряжение на зажимах.

Благодаря равенству электрических сил, действующих на электроны в заряженном конденсаторе, он продолжает оста-

ваться заряженным, когда его отключают от источника тока рубильником P_1 .

Графики изменения зарядного тока i_z и собственного напряжения u_C конденсатора при его заряде изображены на рис. 36.

Большая величина зарядного тока в начале заряда объясняется тем, что в первый момент после включения рубильника вся внутренняя поверхность пластины A свободна и на нее с большой скоростью устремляются электроны под действием электрического поля источника. В дальнейшем, по мере того как поверхность пластины A занимается электронами и соответственно возрастают силы отталкивания их суммарного заряда на пластине, скорость движения электронов в цепи уменьшается и доходит до нуля в конце заряда. Начальная величина зарядного тока ($I_{з.н}$) определяется законом Ома

$$I_{з.н} = \frac{U}{R},$$

где R — сопротивление приемника (реостата).

Энергия, которая расходуется источником при заряде конденсатора, может быть определена по формуле

$$W_{эл} = \frac{U^2 C}{2} \text{ джоуль,} \quad (38)$$

где U — напряжение источника в вольтах;

C — емкость конденсатора в фарадах.

Эта энергия накапливается электрическим полем конденсатора и может быть использована при разряде конденсатора для получения от него электрического тока.

Для разряда конденсатора достаточно включить рубильник P_2 . Под действием сил отталкивания отрицательного заряда электроны станут переходить с пластины A на пластину B и нейтрализовать там положительно заряженные атомы, причем вначале электроны будут двигаться быстро, а затем все медленнее в соответствии с уменьшением заряда на пластине A . В результате такого движения электронов конденсатор сравнительно быстро разряжается. Энергия электрического поля конденсатора расходуется электронами на преодоление сопротивления приемника (реостата) и переходит в тепловую.

Величина начального разрядного тока ($I_{р.н}$) также определяется законом Ома

$$I_{р.н} = \frac{U}{R}.$$

Графики разрядного тока i_p конденсатора и его собственного напряжения u_C приводятся на рис. 37.

Таковы физические процессы, возникающие при заряде и разряде конденсатора.

При использовании конденсаторов для практических целей очень важно бывает знать продолжительность их заряда или разряда, а также значения тока или напряжения в отдельные моменты времени. Для этого установлена величина τ , называемая постоянной времени.

Физически постоянная времени представляет собой время, за которое ток или напряжение в цепи конденсатора изменится на определенную величину от своего начального или конечного значения. Так, если взять заряд конденсатора

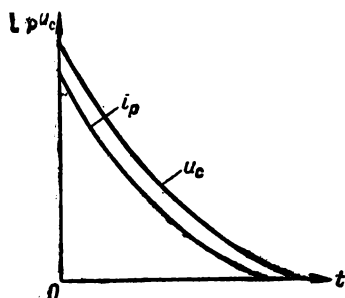


Рис. 37

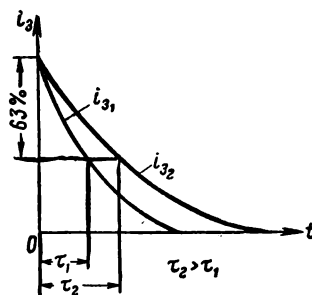


Рис. 38

(рис. 36), то за время τ от начала заряда ток уменьшится на 63% от своего начального значения, а напряжение увеличится от нуля до 63% конечного значения, равного напряжению источника тока.

В режиме разряда конденсатора ток и напряжение за время τ уменьшатся на 63% от своих начальных значений. Вследствие того что ток и напряжение в конце режимов изменяются значительно медленнее, чем в начале (рис. 36 и 37), вся продолжительность режима составляет примерно 5 τ .

Постоянная времени может быть подсчитана по формуле

$$\tau = CR, \quad (39)$$

где C — емкость конденсатора в фарадах;

R — сопротивление приемника (реостата) в омах.

Зависимость постоянной времени от емкости конденсатора и сопротивления цепи, хотя бы для режима заряда, можно объяснить так. С увеличением емкости увеличивается и заряд $Q = CU$, который должен сообщить источник конденсатору. Для большего по величине заряда потребуется и больше времени, так как скорость движения электронов в цепи зависит лишь от напряжения источника и величины сопротивления. Эти же две последние величины для рассматриваемого случая остаются неизменными. Увеличение продолжительности режима приводит и к увеличению τ , как это показано на рис. 38.

С увеличением сопротивления в цепи уменьшается начальная величина тока $I = \frac{U}{R}$, а следовательно, и начальная скорость движения электронов, поэтому потребуется больше времени для сообщения конденсатору одного и того же заряда. Увеличение продолжительности режима опять ведет к увеличению τ . Нетрудно понять, что с уменьшением R и C постоянная времени будет уменьшаться.

В реальных электрических цепях τ составляет тысячные и менее доли секунды.

В заключение рассмотрим работу конденсатора при изменяющемся напряжении источника. В таком режиме конденсатор обычно и работает в различных электрических цепях. Режим работы характеризуется непрерывным чередованием зарядов и разрядов вследствие нарушения равенства между напряжением источника и напряжением на пластинах конденсатора.

Опыт показывает, что величина тока при заряде и разряде пропорциональна скорости изменения напряжения, подводимого к конденсатору. Скорость изменения напряжения принято обозначать так:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t},$$

где ΔU — равномерное изменение напряжения за небольшое время Δt .

Установим математическую зависимость между током в цепи и скоростью изменения напряжения. При постоянной скорости изменения напряжения ток I_c в цепи должен оставаться постоянным по величине, поэтому количество электричества Δq , проходящего по цепи за время Δt , можно определить по формуле

$$\Delta q = I_c \Delta t.$$

Это же количество электричества можно определить и так:

$$\Delta q = C \Delta U,$$

где C — емкость конденсатора.

Из сравнения двух равенств можем написать

$$I_c \Delta t = C \Delta U;$$

отсюда

$$I_c = C \frac{\Delta U}{\Delta t}. \quad (40)$$

Полученная формула имеет большое значение для теоретического исследования физических процессов, происходящих в цепях с конденсаторами. К формуле мы будем прибегать в дальнейшем.

При работе конденсатора в режимах заряда и разряда в его изолирующем слое происходит смещение электронных орбит атомов в сторону положительно заряженной пластины под действием электрического поля (§ 12). А так как всякое движение электронов есть электрический ток, то и смещение электронов в изолирующем слое также представляет собой электрический ток. Этот ток называют током смещения в диэлектрике.

§ 30. УСТРОЙСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

По устройству конденсаторы бывают бумажные, слюдяные, керамические и электролитические.

Бумажный конденсатор состоит из двух длинных лент алюминевой или оловянной фольги, разделенных между собой тонким слоем специальной конденсаторной бумаги, пропитанной парафином. Ленты вместе с бумагой свернуты в рулон и заключены в картонную трубку или металлическую коробочку либо запрессованы в пластмассу. Открытые концы трубки или металлической коробочки залиты слоем влагонепроницаемой мастики. Ленты имеют наружные металлические выводы, которые проходят через мастичный слой. Выводы служат для включения конденсатора в электрическую цепь.

Конденсаторы изготавливаются емкостью от 50 *нф* до 100 *мкф* на рабочее напряжение 120—500 *в*. Кроме рабочего, для всех конденсаторов указывается еще пробивное напряжение, при котором изолирующий слой между пластинами пробивается и конденсатор выходит из строя. Пробивное напряжение значительно больше рабочего.

Слюдяные конденсаторы, как правило, имеют большое количество пластин. Пластины изготавливаются из бронзовой или медной фольги и разбиваются на две группы. Каждая группа припаивается к своему выводу. В собранном конденсаторе пластины групп чередуются и отделяются одна от другой тонким слоем слюды.

В многопластинчатом конденсаторе (в отличие от простейшего, рассмотренного в § 12) используются обе стороны каждой пластины, кроме двух крайних пластин, поэтому емкость конденсатора определяется формулой

$$C = \frac{\epsilon S(n-1)}{d},$$

где n — количество пластин в конденсаторе.

Конденсаторы изготавливаются емкостью 10—500 *нф* на рабочее напряжение 250—500 *в*.

Керамические конденсаторы имеют вид трубочек или дисков, изготовленных из специальной керамики. На цилиндрические поверхности трубки, а также на боковые поверхности

диска наносится проводящий слой. Этот слой и образует обкладки конденсатора. Обкладки имеют металлические выводы. Конденсаторы изготавливаются емкостью 2—750 $\mu\text{ф}$ на рабочее напряжение до 500 в.

У электролитического конденсатора в качестве изолирующего слоя используется оксидная пленка (слой окисла металла) на тонкой алюминиевой ленте. Сама лента выполняет роль одной из обкладок конденсатора. Второй обкладкой служит электролит, т. е. жидкий проводник, касающийся оксидной пленки. Электролит представляет собой водный раствор глицерина, борной кислоты и нашатыря.

Электролитические конденсаторы бывают мокрые и сухие. В мокром конденсаторе алюминиевая лента вместе с электролитом помещена в алюминиевый стакан, который фактически является выводом электролита. Сверху стакан закрыт слоем мастики, через который проходит вывод от алюминиевой ленты.

Сухой электролитический конденсатор имеет две ленты из алюминиевой фольги. Одна из лент покрыта оксидной пленкой. Ленты разделены волокнистыми прокладками, пропитанными электролитом, свернуты в рулон и вставлены в картонную гильзу. Гильза сверху залита слоем мастики, через который проходят выводы от лент.

Электролитические конденсаторы имеют определенную полярность, т. е. они могут работать лишь в том случае, когда плюс источника подводится к обкладке, имеющей оксидную пленку. При несоблюдении полярности конденсатор выходит из строя из-за большого тока, который беспрепятственно пропускает полупроводник — оксидная пленка. Полярность электролитических конденсаторов не дает возможности использовать их в цепях переменного тока.

Основное преимущество электролитических конденсаторов перед другими типами конденсаторов состоит в том, что они обладают значительно большей емкостью при одинаковых размерах благодаря очень тонкому слою оксидной пленки.

Кроме того, производство электролитических конденсаторов обходится дешевле.

Электролитические конденсаторы изготавливаются емкостью 5—20 $\mu\text{ф}$ на рабочее напряжение 150—500 в, а также емкостью 10—2000 $\mu\text{ф}$ на напряжение в 8—50 в.

Кроме рассмотренных типов конденсаторов, имеются еще конденсаторы с переменной емкостью, т. е. такие, у которых емкость можно изменять. Такие конденсаторы состоят из двух

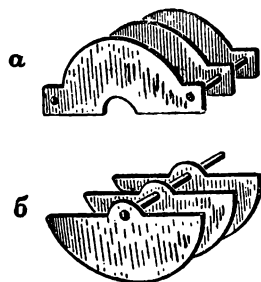


Рис. 39

групп металлических пластин. Одна группа пластин, неподвижная (рис. 39, а), образует статор, а вторая группа, подвижная (рис. 39, б), образует ротор конденсатора.

В собранном конденсаторе ось ротора расположена параллельно стойкам неподвижных пластин, причем пластины ротора при его повороте входят в промежутки между неподвижными пластинами. Наибольшая емкость у конденсатора получается в том случае, когда пластины ротора полностью входят в промежутки между пластинами статора. При полном выводе пластины ротора из промежутков между неподвижными пластинами емкость конденсатора получается наименьшей, практически равной нулю. Изолирующим слоем между пластинами служит воздух или слюда.

Разновидностью конденсаторов переменной емкости являются так называемые подстроечные конденсаторы, или конденсаторы полупеременной емкости. Отличие их от описанных конденсаторов лишь в том, что они состоят всего из двух пластин, а в качестве изолирующего слоя у них используется обычно керамика. Пластинами у этих конденсаторов служит металлический слой, нанесенный на керамические основания. Пластины имеют выводы для включения в электрическую цепь.

Изолирующим слоем у подстроечных конденсаторов служит верхнее основание, выполненное в форме диска. Оба основания через их центральные отверстия скреплены короткой металлической осью. Ось имеет шлиц на стороне основания диска и для изменения емкости конденсатора может поворачиваться вместе с диском отверткой.

Подстроечные конденсаторы находят большое применение в радиотехнике. Емкость их очень незначительна. Измеряется долями или единицами пикофард.

§ 31. СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ МЕЖДУ СОБОЙ

Конденсаторы, как и другие приемники электрической энергии, можно соединять между собой последовательно, параллельно и смешанно. При этом необходимо знать эквивалентную емкость цепи.

Эквивалентной емкостью $C_{\text{эк}}$ называется емкость такого конденсатора, который будучи включен в цепь вместо всех данных конденсаторов, не изменяет величины электрического заряда, отдаваемого источником в цепь для заряда пластин.

При параллельном соединении конденсаторов все они получают одинаковое напряжение U , равное напряжению источника. Величина зарядов конденсаторов определяется формулами

$$Q_1 = C_1 U; Q_2 = C_2 U; \dots; Q_n = C_n U.$$

Полный электрический заряд в цепи

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n. \quad (41)$$

Величину полного заряда можно выразить и так:

$$Q_0 = C_{\text{эк}} U,$$

где $C_{\text{эк}}$ — эквивалентная емкость цепи.

Подставив значения зарядов в формулу (41), получим

$$C_{\text{эк}} U = C_1 U + C_2 U + \dots + C_n U,$$

или после сокращения на U

$$C_{\text{эк}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (42)$$

Таким образом, при параллельном соединении конденсаторов эквивалентная емкость цепи равна сумме емкостей отдельных конденсаторов. Физически это означает, что каждый новый конденсатор, подсоединенный параллельно другому, уже включенному в цепь, увеличивает поверхность его обкладок за счет поверхности своих обкладок. Это, как известно, приводит к увеличению емкости, так как емкость конденсатора прямо пропорциональна поверхности его пластин.

К параллельному соединению конденсаторов прибегают в том случае, когда в цепи требуется большая емкость, причем один конденсатор с такой емкостью получается громоздким и не подходит по конструктивным соображениям.

При последовательном соединении все конденсаторы благодаря явлению электростатической индукции получают одинаковый заряд Q . Наличие одинаковых зарядов у всех конденсаторов приводит к различным напряжениям у них на обкладках (в соответствии с емкостью каждого конденсатора), как это следует из формул

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}; \quad U_2 = \frac{Q}{C_2}; \dots; \quad U_n = \frac{Q}{C_n}.$$

Сложив напряжения на отдельных конденсаторах, получим полное напряжение, подаваемое в цепь источником:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n. \quad (43)$$

Напряжение источника можно выразить через эквивалентную емкость:

$$U = \frac{Q}{C_{\text{эк}}}.$$

Подставив значения напряжений в формулу (43), получим

$$\frac{Q}{C_{\text{эк}}} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \dots + \frac{Q}{C_n},$$

или после сокращения на Q

$$\frac{1}{C_{\text{эк}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}, \quad (44)$$

т. е. величина, обратная эквивалентной емкости цепи, равна сумме таких же величин отдельных конденсаторов.

По аналогии с эквивалентным сопротивлением для параллельного соединения приемников можно сказать, что эквивалентная емкость цепи при последовательном соединении конденсаторов должна быть меньше самой малой емкости соединения. Объясняется это тем, что об эквивалентной емкости в цепи судят по величине заряда $Q = C_{\text{эк}}U$, заряд же этот определяется емкостью самого малого конденсатора.

К последовательному соединению конденсаторов прибегают обычно в тех случаях, когда напряжение источника значительно выше рабочего напряжения конденсатора. Чтобы избежать пробоя, несколько одинаковых конденсаторов соединяют последовательно и таким образом понижают напряжение на каждом из них. Число n последовательно включенных конденсаторов может быть определено по формуле

$$n = \frac{U}{U_p},$$

где U — напряжение источника;

U_p — рабочее напряжение одного конденсатора.

Для вычисления эквивалентной емкости при смешанном соединении конденсаторов особой формулы не имеется, и емкость в каждом отдельном случае вычисляют, применяя сначала формулу (44) к неразветвленным участкам цепи, а затем формулу (42) к параллельно соединенным участкам.

Смешанное соединение конденсаторов широко используется в радиотехнике.

Перед включением конденсаторов в электрическую цепь рекомендуется проверить их исправность. Для проверки конденсатора его нужно включить под напряжение источника и затем сразу отключить. Исправный конденсатор после отключения должен остаться заряженным, поэтому если его выводы соединить проводником, то в момент соединения между проводником и выводом проскочит искра. Отсутствие искры будет свидетельствовать о том, что у конденсатора пробит изолирующий слой. Во избежание короткого замыкания источника тока (замыкание может возникнуть при наличии пробоя в изолирующем слое) последовательно с испытываемым конденсатором необходимо включать какой-либо приемник (реостат или электролампу), рассчитанный на напряжение источника.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ III.

1. Что называется постоянным электрическим током в твердых проводниках?
2. Какие условия необходимы для получения тока?
3. Что такое замкнутая электрическая цепь и из каких участков она состоит?

4. Что называется проводниками и непроводниками электрического тока и каково их значение в электротехнике?
 5. Что такое электрическая прочность диэлектриков?
 6. Каковы наиболее употребительные изолирующие материалы?
 7. В чем состоит особенность изолирующих свойств воздуха?
 8. В чем заключается свойство простой электрической цепи?
 9. Что называется величиной тока и в каких единицах он измеряется?
 10. По какой формуле можно подсчитать количество электричества, проходящего по участку цепи?
 11. Что такое сопротивление и проводимость проводников и в каких единицах они измеряются?
 12. От чего зависит величина сопротивления твердых проводников?
 13. Что такое электродвижущая сила источника и напряжение на его зажимах?
 14. Какова единица измерения электродвижущей силы и напряжения?
 15. Каков физический смысл формулы закона Ома?
 16. Как можно вычислить потенциал в какой-либо точке внешней цепи?
 17. В чем заключается второе правило Кирхгофа?
 18. Каковы три возможных режима работы источника электрической энергии?
 19. Чем характеризуется режим холостого хода источника, а также режимы нагрузки и короткого замыкания?
 20. Каковы способы соединения приемников между собой и что такое эквивалентное сопротивление внешней цепи?
 21. Как вычисляется эквивалентное сопротивление при смешанном соединении приемников?
 22. В чем заключается абсолютный способ измерения сопротивления приемников и какова его точность?
 23. На чем основан способ измерения сопротивлений мостом?
 24. Что называется мощностью электрического тока и каковы единицы ее измерения?
 25. Что называется полезной мощностью источника электрической энергии?
 26. Каковы формулы для вычисления мощности и электрической энергии тока?
 27. Какие требования предъявляются к плавким предохранителям?
 28. Как подбираются предохранители для защиты электрических цепей?
 29. Какие электрические данные необходимо знать о реостате?
 30. Каково назначение потенциометра?
 31. Какие бывают потенциометры?
 32. Какие физические процессы происходят при заряде и разряде конденсатора?
 33. От чего зависит величина зарядного тока в цепи конденсатора?
 34. Что такое постоянная времени и от чего зависит ее величина?
 35. Что следует понимать под током смещения в диэлектриках?
 36. Какие бывают конденсаторы по устройству?
 37. В чем особенность электролитического конденсатора?
 38. Что такое эквивалентная емкость в цепи, имеющей конденсаторы?
-

ГЛАВА IV

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

А. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

§ 32. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТОКА

Впервые магнитное поле было обнаружено в 1820 году при помощи магнитной стрелки. Было замечено, что если магнитную стрелку поместить вблизи проводника с током, то в зависимости от расположения проводника по отношению к стрелке она отклонится в ту или иную сторону от своего нормального положения (т. е. от положения, совпадающего с плоскостью магнитного меридиана) и займет положение, перпендикулярное к проводнику (рис. 40).

Отклонение стрелки свидетельствовало о наличии в пространстве, окружающем проводник, силового поля, аналогичного полю, создаваемому электрическими зарядами. Исследования показали, что поле электрического тока обладает всеми свойствами поля постоянного магнита, поэтому его и называли магнитным полем.

Кроме действия на магнитную стрелку, поле намагничивает некоторые тела, т. е. придает им свойства постоянных магнитов, вызывает движение другого проводника с током и, наконец, при некоторых условиях производит электризацию концов проводника, превращая проводник в источник электрической энергии.

Перечисленные свойства имеют большое практическое значение. Намагничивание тел широко используется во многих электрических приборах и электрических машинах постоянного и переменного тока. Движение проводников с током под действием магнитного поля дало возможность создать электрические двигатели, а получение в

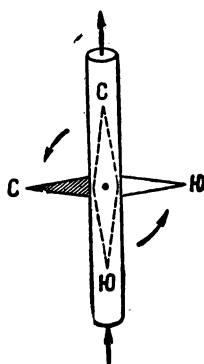


Рис. 40

проводниках электродвижущей силы позволило в широком масштабе использовать электрическую энергию.

С физической точки зрения создание магнитного поля сводится к тому, что электрический ток, проходя по цепи, оказывает воздействие и на материальную среду, которая его окружает. В результате возбуждения этой среды в пространстве, окружающем проводник с током (или магнит), начинают проявляться перечисленные выше свойства.

Таким образом, можно сказать, что под магнитным полем следует понимать материальную среду, возбужденную электрическим током (или магнитом) в окружающем пространстве.

На возбуждение среды током расходуется энергия. На основе закона сохранения энергии энергия электрического тока переходит в энергию магнитного поля при его создании.

§ 33. ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Для большей наглядности магнитные поля принято изображать на чертежах замкнутыми кривыми, называемыми магнитными силовыми линиями.

На рис. 41 изображено магнитное поле постоянного стержневого магнита, имеющего два полюса: северный *С* и южный *Ю*. Условились считать, что магнитные силовые линии выходят из северного полюса магнита и входят в южный. Линии эти названы силовыми потому, что касательная к ним в любой точке показывает направление силы магнитного поля.

До появления электронной теории ученые считали, что в природе существуют два вида «магнетизма», и долгое время безуспешно пытались отделить северный полюс магнита от южного. Они предполагали, что отдельно взятый северный полюс элементарного магнита должен двигаться по направлению магнитных силовых линий.

На основе этого предположения и было установлено направление силовых линий. Если магнитные силовые линии направлены перпендикулярно к чертежу, их изображают точками или крестиками. Точки означают, что силовые линии направлены от чертежа к глазу наблюдателя, крестики же указывают обратное направление, т. е. за чертеж.

Магнитные поля очень удобно изучать с помощью железных опилок,

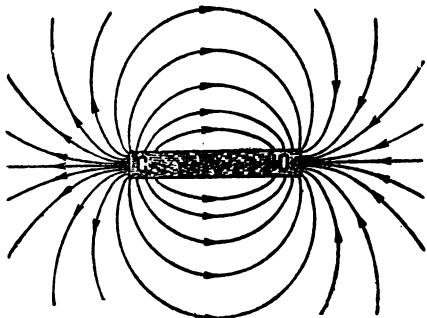


Рис. 41

равномерно насыпанных на бумаге. Под действием поля опилки намагничиваются и, превращаясь в маленькие магнитики, располагаются вдоль магнитных силовых линий, образуя магнитные спектры, или картины полей, примерно так же, как это показано на рис. 41. При изучении магнитного и электрического полей нужно твердо помнить, что магнитных силовых линий и линий электрического поля в природе не существует. Они представляют собой лишь графическое (условное) изображение реальных полей, но в то же время облегчают изучение физических явлений, связанных с полями.

Магнитные силовые линии представляются обычно как непересекающиеся замкнутые кривые. При нарастании тока в проводнике они как бы увеличиваются в своем количестве и по длине, а при уменьшении тока, наоборот, сокращаются и исчезают.

Применяя различную густоту магнитных силовых линий, можно характеризовать графически и силовые свойства магнитных полей. В тех местах, где магнитное поле сильнее, силовые линии проводят чаще, а там, где поле слабее, их проводят реже. Если, например, создать одновременно несколько магнитных полей, то они складываются и образуют результирующее поле. При этом поля, имеющие одинаковое направление, дают более сильное результирующее поле, а поля, направленные противоположно, дают ослабленное результирующее поле. При графическом изображении результирующего поля в первом случае густоту силовых линий делают больше в местах сложения полей, а во втором случае — меньше.

Разной густотой силовых линий можно характеризовать и влияние различных сред на силовые свойства магнитных полей. Опыт показывает, что наиболее сильные магнитные поля получаются при наличии в среде железа, стали и чугуна, поэтому при изображении таких полей силовые линии проводят густо. В воздухе и вакууме магнитные поля получаются значительно слабее, поэтому и силовые линии при изображении полей проводят редко.

§ 34. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПРЯМОГО ТОКА, КРУГОВОГО ТОКА И СОЛЕНОИДА

Магнитное поле прямого тока изображено на рис. 42. Магнитные силовые линии этого поля в виде concentрических окружностей охватывают проводник по всей длине и имеют центр на его геометрической оси (рис. 42, а).

Крестик на рис. 42, б означает, что ток в проводнике направлен за чертеж; при противоположном направлении тока на рисунке ставится точка.

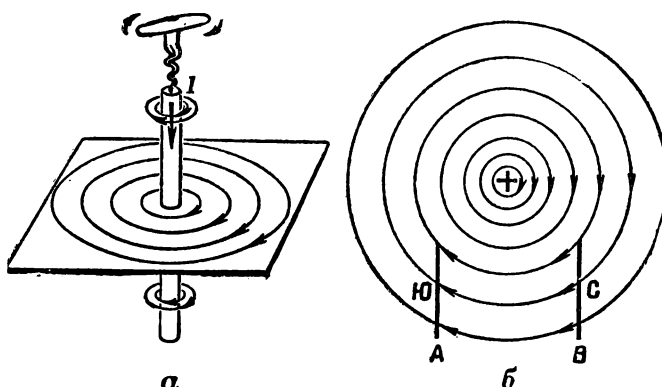


Рис. 42

Различная густота магнитных силовых линий свидетельствует о неравномерности поля, ослабевающего по мере удаления от проводника (рис. 42, б). Направление магнитных силовых линий определяется по правилу буравчика (с правой нарезкой). Правило формулируется так: **если буравчик ввинчивать в проводник по направлению тока (рис. 42, а), то направление вращения ручки буравчика укажет направление магнитных силовых линий.** Правилom можно пользоваться и для определения направления тока в проводнике, если известно направление поля (направление магнитных силовых линий).

Магнитное поле прямого тока характерно тем, что оно не имеет явно выраженных полюсов. Однако эти полюсы в любой части поля можно легко получить, если перпендикулярно к магнитным силовым линиям провести две параллельные плоскости А и В (на рис. 42, б показаны в виде двух параллельных прямых). Из плоскости В магнитные силовые линии выходят, поэтому плоскость можно рассматривать как северный полюс, плоскость же А можно рассматривать как южный полюс, так как в нее магнитные силовые линии входят.

Картина поля изменится, если ток пропустить через тот же проводник, но согнутый в виде кольца (рис. 43, а). Это поле, называемое полем кругового тока, имеет полное сходство с полем короткого постоянного магнита. У него также два явно выраженных полюса С и Ю, которым соответствуют две стороны витка. Ту сторону, в которую магнитные

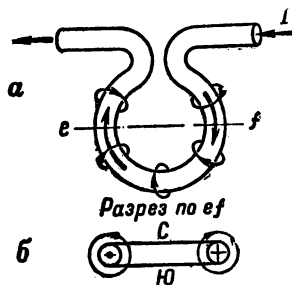


Рис. 43

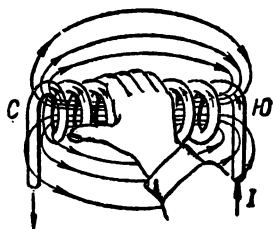


Рис. 44

силовые линии входят, следует рассматривать как южный полюс, а противоположную сторону — как северный полюс. На рис. 43, б виток для большей наглядности показан в разрезе по линии *ef*.

Виток, по которому проходит ток, обладает всеми свойствами постоянного магнита. Так, если виток подвесить на тонких, гибких проводах, то он ориентируется с севера на юг, как

магнитная стрелка компаса. Два витка, расположенные вблизи, разноименными полюсами притягиваются, а одноименными отталкиваются. Наконец, виток, как и магнит, притягивает к себе обоими полюсами железо, сталь и чугун.

Однако поле кругового тока, или поле одного витка, является очень слабым. Для создания более сильного поля ток пропускают через проводник, согнутый в виде спирали. Такой проводник, когда по нему проходит ток, называется соленоидом.

Магнитное поле соленоида изображено на рис. 44. По внешнему виду оно ничем не отличается от поля стержневого магнита (рис. 41). У соленоида поля отдельных витков складываются и дают сильное результирующее поле.

Полюсы соленоида удобнее всего определять по правилу правой руки. Для этого правую руку нужно наложить на соленоид таким образом, чтобы ток как бы выходил из четырех пальцев (рис. 44), тогда отогнутый большой палец укажет северный полюс соленоида. Соленоид, как и виток с током, обладает всеми свойствами постоянного магнита.

Магнитное поле тока отличается от поля постоянного магнита тем, что в нем можно вызвать изменение положения силовых линий не только перемещением проводника, но и изменением величины тока в проводнике.

Если магнитные силовые линии изменяют свое положение в пространстве, поле называют **движущимся** (например, поле тока в момент изменения его величины). Если же магнитные силовые линии не изменяют положения в пространстве, поле называют **неподвижным** (например, поле постоянного магнита, находящегося в покое).

§ 35. ПРИРОДА ПОЛЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Сходство полей и свойств постоянного магнита и соленоида уже давно заставило ученых предположить, что поле постоянных магнитов имеет одинаковую природу с полем электрического тока. Однако до появления электронной теории (начало 20 в.) такое предположение не имело научного объяснения.

Электронная теория дает простое и правильное истолкование природы поля постоянного магнита. Элементарные магнитики, о которых говорила старая теория (теория Вебера), в электронной теории заменяются атомами, имеющими собственные магнитные поля. Поля эти создаются круговыми токами, образуемыми движением электронов по орбитам вокруг ядер атомов.

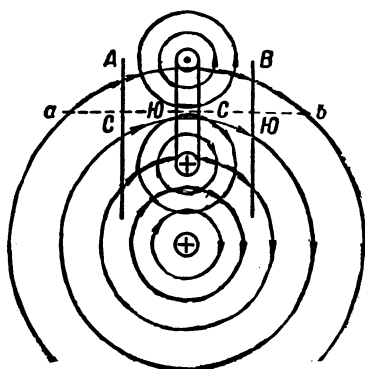


Рис. 45

Виток с током, помещенный в магнитное поле, всегда стремится занять такое положение, при котором ось ab его поля (рис. 45) совпала бы с направлением внешнего магнитного поля. Объясняется это силами притяжения, возникающими между разноименными полюсами внешнего поля и поля витка. В результате сложения двух полей магнитное поле внутри витка усиливается, так как оба поля имеют здесь одинаковое направление.

Если около первого витка поместить второй, то он также займет положение, параллельное первому, и еще больше усилит его магнитное поле. Прибавляя витки, можно получить своеобразный соленоид, собственное поле которого, как и в обычном соленоиде, получается в результате сложения полей отдельных витков. С исчезновением внешнего поля витки сохраняют занятое положение благодаря взаимодействию полюсов их собственных полей.

Орбиты электронов в атомах физических тел находятся в самых разнообразных положениях (рис. 46, а). Но как и обычные круговые токи, они также поворачиваются, стремясь расположиться своими осями вдоль силовых линий внешнего магнитного поля (рис. 46, б) ¹. Вследствие ориентировки элек-

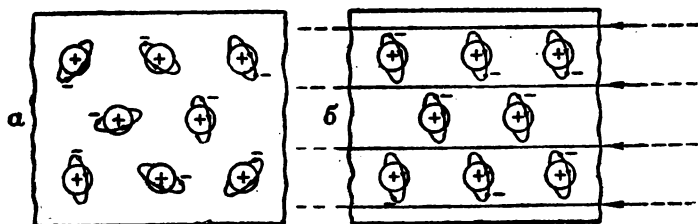


Рис. 46

¹ На рис. 46, б стрелками показано направление движения электронов по орбитам вокруг ядер атомов.

тронных орбит поля отдельных атомов складываются и создают в теле результирующее поле, которое у некоторых тел частично сохраняется даже и после исчезновения внешнего магнитного поля (остаточный магнетизм).

Возникает вопрос: как же создается магнитное поле у естественных магнитов? Для ответа на этот вопрос напомним, что земля обладает собственным магнитным полем. Это поле создается круговым движением положительных и отрицательных

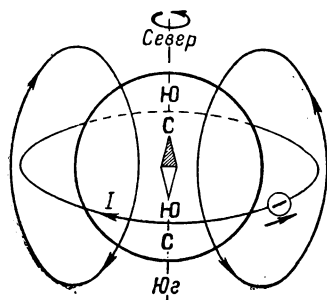


Рис. 47

ионов, имеющих в атмосферном слое земли. Слой атмосферы вместе с ионами поворачивается вокруг оси земли при ее вращении, и это приводит к появлению сильных круговых токов вокруг земли, а значит, и к созданию ее собственного магнитного поля.

Образование магнитного поля земли поясняется на рис. 47. На этом рисунке движение электронов совпадает с направлением вращения земли, круговой же ток I имеет обратное направление.

Магнитные силовые линии поля внутри земли по правилу буравчика должны быть направлены от северного географического полюса к южному, следовательно, на севере земля имеет южный магнитный полюс, а на юге — северный. Этим и объясняется, почему северный полюс магнитной стрелки компаса всегда отклоняется к северу, а южный — к югу (взаимодействие разноименных полюсов). Под действием магнитного поля земли и происходит намагничивание некоторых руд, близких по составу к стали.

Таким образом, мы приходим к выводу, что с точки зрения электронной теории такие понятия, как северный и южный «магнетизм», «магнитная масса», не отражают физической сущности этих явлений. В действительности же то, что раньше называли магнетизмом, есть не что иное, как проявление свойства тока создавать вокруг себя магнитное поле.

§ 36. СВОЙСТВА СИЛ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Свойства магнитного поля обусловлены действием сил поля на электроны, находящиеся в телах. По характеру действия силы магнитного поля коренным образом отличаются от сил электрического поля.

В электрическом поле силы действуют на электроны независимо от того, находятся ли электроны в покое или движении, кроме того, движение электронов под действием сил осуществляется только по силовым линиям. В магнитном же

поле действие сил более сложно и проявляется только при движении электронов.

Действительно, магнитная стрелка поворачивается под действием сил неподвижного магнитного поля потому, что вокруг ее атомов движутся связанные электроны. По той же причине ориентируются и электронные орбиты при намагничивании тел полем.

Проводник с током, помещенный в неподвижное магнитное поле постоянного магнита или тока, испытывает действие сил поля потому, что в проводнике движутся свободные электроны. Наконец, действие сил поля на свободные электроны проводника наблюдается и в том случае, когда проводник без тока вместе с электронами перемещается в поле какими-либо внешними силами (например, механическими). Если бы магнитное поле действовало и на неподвижные электроны, то электрический ток можно было бы получить с помощью постоянного магнита, поместив в его поле замкнутый проводник и не расходуя при этом никакой энергии. Однако получить таким образом ток невозможно, так как это противоречило бы закону сохранения энергии.

Теперь рассмотрим характер действия сил магнитного поля на движущиеся электроны.

Было показано (рис. 46, б), что силы магнитного поля действуют на связанные электроны атомов тел таким образом, что вынуждают их двигаться по орбитам вокруг магнитных силовых линий внешнего поля в плоскостях, перпендикулярных к этим линиям. Однако направление движения электронов по ориентированным орбитам у различных тел разное.

У большинства тел, называемых парамагнитными (марганец, алюминий и др.), электроны движутся в таком направлении, при котором создаваемые ими поля внутри ориентированных орбит имеют одинаковое направление с внешним полем, т. е. электроны движутся по орбитам в том же направлении, что и свободные электроны в витке с током, помещенном в магнитное поле (см. рис. 45).

У другой группы тел, называемых диамагнитными (медь, сера и др.), направление движения электронов противоположно тому, которое имеют свободные электроны в витке с током. Поэтому поля, создаваемые электронами внутри ориентированных орбит, направлены против внешнего поля.

Вследствие различного направления движения электронов вокруг атомов по ориентированным орбитам в указанных телах парамагнитные тела, помещенные во внешнее магнитное поле, усиливают его за счет собственных полей атомов (с ориентированными орбитами), диамагнитные же тела, наоборот, ослабляют это поле. Нетрудно понять, что по той же самой причине всякое парамагнитное тело, поднесенное к любому полюсу постоянного магнита, притягивается, так как в нем воз-

буждается разноименный полюс, диамагнитное же тело, наоборот, отталкивается любым полюсом магнита.

На свободные электроны, движущиеся в вакууме, силы магнитного поля действуют несколько своеобразно. Если, например, направление движения электрона совпадает с направлением магнитных силовых линий ($\alpha = 0^\circ$) или противоположно ему ($\alpha = 180^\circ$), силы магнитного поля не оказывают на него никакого влияния и электрон, попадая в поле, продолжает двигаться в прежнем направлении, как бы скользя вдоль силовых линий.

Если же электрон движется перпендикулярно к силовым линиям ($\alpha = 90^\circ$), то силы поля изменяют направление его движения и заставляют двигаться вокруг силовых линий по окружности в перпендикулярной к ним плоскости (рис. 48, а).

Наконец, если электрон входит в поле под некоторым углом ($\alpha < 90^\circ$) к силовым линиям, то силы поля направляют его движение по винтовой линии и электрон будет как бы закручиваться вокруг силовых линий поля (рис. 48, б).

Такой характер действий сил магнитного поля на отдельные электроны объясняется тем, что каждый движущийся электрон создает вокруг себя собственное магнитное поле. Результирующее поле по одну сторону движения электрона усиливается, а по другую, наоборот, ослабляется. Неравномерность результирующего поля по отношению к электрону и приводит к тому, что электрон выталкивается силами поля в его более разреженную часть.

На рис. 49, а изображено внешнее магнитное поле, а также магнитное поле электрона (пунктиром) для случая, когда электрон движется перпендикулярно к магнитным силовым линиям внешнего поля. Условное направление тока, соответствующее движению электрона, на рисунке указано крестиком.

С левой стороны от электрона магнитные силовые линии его поля имеют одинаковое направление с силовыми линиями внешнего поля, и поэтому результирующее поле в этом месте

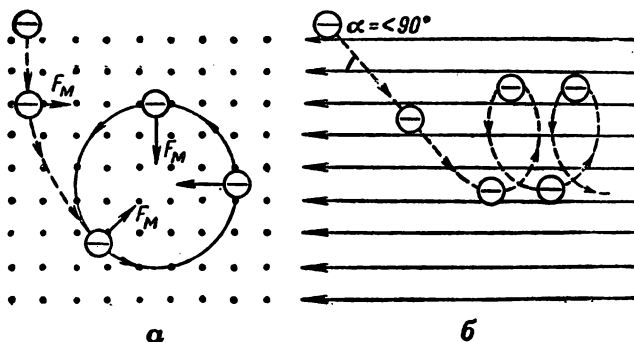


Рис. 48

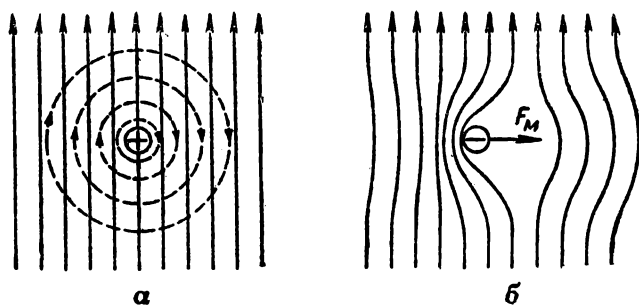


Рис. 49

усиливается. Наоборот, с правой стороны от электрона силовые линии его поля направлены против силовых линий внешнего поля и, следовательно, в данном месте результирующее поле ослабляется. Сила F_m результирующего магнитного поля (рис. 49, б) направлена перпендикулярно к силовым линиям и вызывает перемещение электрона в более разреженную часть результирующего поля.

Таким образом, в рассматриваемом случае силы магнитного поля действуют на электрон в каждой точке пути перпендикулярно к его движению и направлены к центру окружности, по которой происходит движение электрона в поле. Направление действия сил поля на электрон в отдельных точках его пути показано на рис. 48, а. Силы магнитного поля в любой момент времени уравниваются центробежными силами, которые возникают в результате движения электрона по окружности.

Отсутствие действия сил магнитного поля на отдельные электроны, движение которых совпадает с направлением силовых линий поля или противоположно ему, объясняется тем, что в этом случае внешнее поле лишь одинаково искажается вокруг каждого электрона его магнитным полем, поэтому неравномерности у результирующего поля не возникает.

Винтовой характер движения электрона, попадающего в магнитное поле под углом $\alpha < 90^\circ$, объясняется следующим образом. Начальное движение электрона (т. е. движение вне поля) можно разложить на два простых взаимно перпендикулярных движения: на движение вдоль силовых линий магнитного поля и на движение, перпендикулярное к ним. На первое движение поле не оказывает никакого действия, поэтому электрон стремится сохранить его в том же направлении. Второе же движение под действием сил поля переходит в движение по окружности. Сложение этих двух видов движения и дает сложное движение электрона в магнитном поле в виде движения по винтовой линии.

В проводнике, состоящем из большого количества атомов,

силы магнитного поля не могут вызвать движения свободных электронов по окружности или по винтовой линии, так как этому препятствуют и сами свободные электроны, и связанные электроны атомов. Действие сил поля сводится лишь к тому, что они оказывают давление на свободные электроны в направлении, перпендикулярном к их начальному движению.

На рис. 50, а изображен проводник с током I , помещенный во внешнее магнитное поле. На каждый свободный электрон

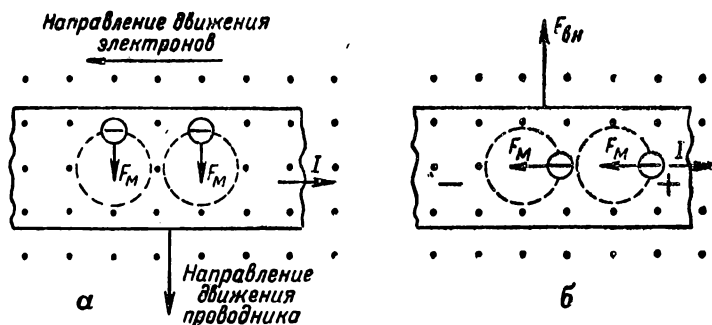


Рис. 50

этого проводника действует сила магнитного поля F_m , которая стремится вызвать движение электрона по окружности вокруг магнитных силовых линий (на рисунке окружности изображены пунктиром). При данном направлении внешнего поля электрон должен двигаться против часовой стрелки, поэтому начальное действие силы показано направленным по вертикали вниз, т. е. перпендикулярно к направлению движения электрона.

Вследствие невозможности вызвать движение электронов по окружностям действие сил поля сводится к тому, что их давление на электроны передается на проводник и он начинает двигаться в магнитном поле в сторону действия сил. Направление движения проводника можно определить по правилу левой руки. Для этого нужно так расположить руку относительно проводника, чтобы магнитные силовые линии как бы входили перпендикулярно в ладонь, а четыре пальца вытянуть по направлению тока в проводнике, тогда отогнутый большой палец укажет направление движения проводника (рис. 50, а).

Рассмотрим, что произойдет в проводнике без тока, если его перемещать в том же поле с помощью внешней силы $F_{вн}$ перпендикулярно к силовым линиям в направлении, указанном на рис. 50, б. При таком движении проводника он как бы пересекает магнитные силовые линии.

Вместе с проводником будут перемещаться и все его свободные электроны. Как и в предыдущем случае, на каждый

электрон начнет действовать магнитная сила F_m , направленная так, чтобы вызвать круговое движение электрона (при указанном на рисунке направлении поля против часовой стрелки). Невозможность кругового движения приведет к тому, что свободные электроны под действием сил поля начнут перемещаться по проводнику влево, т. е. перпендикулярно к своему начальному движению, до тех пор, пока электрические силы отталкивания между ними не уравновесят действие магнитных сил.

В результате левый конец проводника зарядится отрицательно, а правый — положительно, т. е. произойдет электризация концов проводника, благодаря чему он превратится в источник электрической энергии с определенной по величине электродвижущей силой. Если концы проводника соединить проволокой, то по ней пойдет электрический ток. Направление тока, а значит, и направление электродвижущей силы можно определить по правилу правой руки. Для этого необходимо **расположить руку относительно проводника так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь перпендикулярно, а большой палец отогнуть по направлению движения проводника, тогда четыре пальца, вытянутые вдоль проводника, укажут направление электродвижущей силы (или тока).**

Возникновение электродвижущей силы в проводнике под действием магнитного поля называется электромагнитной индукцией. Это явление имеет большое практическое значение, поэтому подробно будет рассмотрено ниже.

Если проводник не перемещать в магнитном поле, то на его свободные электроны силы магнитного поля также будут воздействовать, поскольку эти электроны находятся в непрерывном движении. Однако вследствие хаотичности движения электронов воздействия сил магнитного поля на отдельные электроны будут иметь разные направления, поэтому упорядоченного движения электронов в каком-либо одном направлении силы поля вызвать не смогут.

§ 37. НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКА

Первоначально силу магнитного поля измеряли с помощью постоянного магнита, помещая один из его полюсов в рассматриваемую точку поля и измеряя динамометром силу, действующую на полюс. Измеренная таким путем сила магнитного поля представляла собой фактически силу взаимодействия полюса магнита с разноименным полюсом исследуемого поля.

Для получения одинаковых результатов измерений пользовались магнитами определенных размеров. Брали два тонких постоянных магнита и каждый полюс рассматривали как отдельно взятый. Один магнит подвешивали на нити, а другой

закрепляли неподвижно и определяли силу взаимодействия между разноименными полюсами магнитов, удаленными друг от друга на один сантиметр. Диаметр магнитов подбирали так, чтобы динамометр показывал силу в одну дину (одна дина составляет $\frac{1}{981}$ г). Полюс такого магнита условились считать единичным, хотя известно, что отделить один полюс от другого невозможно.

По аналогии с напряженностью электрического поля силу магнитного поля, действующую на единичный полюс в какой-либо точке поля, условились называть напряженностью магнитного поля. Напряженность поля обозначается буквой H . По абсолютной электромагнитной системе единиц напряженность магнитного поля измеряется в эрстедах. Эрстед — это напряженность такого магнитного поля, которое действует на единичный полюс в данной точке поля с силой в одну дину.

В соответствии с эрстедом устанавливают и густоту магнитных силовых линий поля при его графическом изображении. Так, если в какой-либо точке поля напряженность равна n эрстедам (т. е. если на единичный полюс в данной точке поля действует сила в n дин), то считают, что через площадь в один квадратный сантиметр, перпендикулярную к силовым линиям и совпадающую своим геометрическим центром с рассматриваемой точкой, проходит n магнитных силовых линий. При таком условии каждая магнитная силовая линия поля соответствует одному эрстеду.

Напряженности магнитных полей тока определяются по формулам, например, напряженность магнитного поля прямого тока (рис. 51) определяется по формуле

$$H = \frac{I}{2\pi r}, \quad (45)$$

где I — величина тока в проводнике в амперах;

r — расстояние (по перпендикуляру) рассматриваемой точки от геометрической оси проводника в метрах.

Формула справедлива при условии, если длина проводника намного больше расстояния до рассматриваемой точки.

В принятой у нас практической системе единиц напряженность магнитного поля измеряется в амперах на метр $\left(\frac{a}{m}\right)$.

Физически эта единица означает, что если напряженность в какой-либо точке поля известна и выражена в амперах на метр, то для создания такой же напряженности и в других точках, более удаленных от проводника, необходимо на каждый метр расстояния увеличивать ток в проводнике на соответствующее количество ампер.

Между эрстедом и ампером на метр существует соотношение $1 \frac{a}{м} = 4\pi \cdot 10^{-3}$ эрстед, или $1 \text{ эрстед} = \frac{1000}{4\pi} \frac{a}{м}$.

Напряженность магнитного поля замкнутого соленоида, называемого иначе тороидом (рис. 52, а), определяется по формуле

$$H = \frac{IW}{l} \frac{\text{ампер}}{\text{метр}}, \quad (46)$$

где I — величина тока, проходящего по соленоиду, в амперах;

W — число витков соленоида;

l — длина средней магнитной силовой линии поля соленоида в метрах.

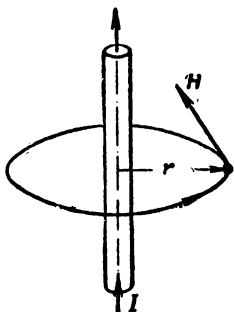


Рис. 51

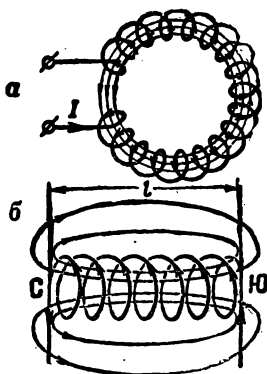


Рис. 52

Формула справедлива для вычисления напряженности и внутри обычного соленоида (рис. 52, б), если его длина намного больше диаметра витка.

Из двух приведенных нами формул (45) и (46) следует, что напряженность магнитного поля в его точках всегда пропорциональна только величине тока, так как прочие величины, входящие в формулы, для данной точки поля остаются неизменными.

Напряженность магнитного поля в каждой точке имеет определенное числовое значение и направление, т. е. является векторной величиной. Следовательно, напряженности можно изображать векторами и применять к ним правила геометрического сложения и вычитания.

§ 38. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ И МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Свойство магнитного поля ориентировать орбиты электронов приводит, как мы уже видели, либо к усилению самого поля (при наличии в нем парамагнитного тела), либо к ослаб-

лению его (при наличии диамагнитного тела). Поэтому, если магнитное поле тока создается в среде, отличной от вакуума, то результирующее поле, т. е. поле, которое получается от сложения поля тока и поля, созданного ориентированными электронами среды, уже нельзя характеризовать напряженностью, определяемой формулами (45) и (46).

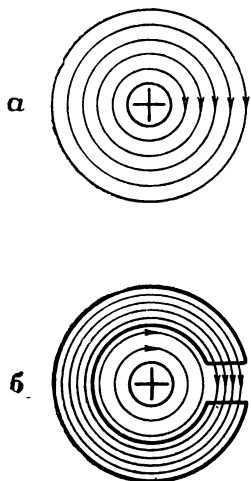


Рис. 53

Для учета силовых свойств результирующего поля введена величина, называемая магнитной индукцией. Магнитная индукция характеризует собой степень намагничивания среды или степень возникающей в ней магнитной деформации. Под магнитной деформацией следует понимать вынужденную ориентировку электронных орбит в теле под действием сил магнитного поля.

С физической точки зрения магнитная индукция представляет собой силу результирующего магнитного поля, которое действует на «единичный» полюс в какой-либо точке поля. Магнитную индукцию принято обозначать буквой B .

На рис. 53, *а* изображено магнитное поле прямого тока, созданное в вакууме, а на рис. 53, *б* — то же поле при внесении в него железного цилиндрического кольца с вырезом, который называется воздушным зазором. В воздушном зазоре результирующее магнитное поле значительно сильнее, так как густота магнитных силовых линий здесь гораздо больше, чем у поля, созданного в вакууме. По свойству силовых линий (замкнутые кривые) их густота в железном кольце должна быть такой же, как и в воздушном зазоре. Усиление результирующего поля в зазоре происходит за счет суммарного поля ориентированных электронов в кольце при неизменной напряженности магнитного поля тока.

Для большей наглядности магнитную индукцию характеризуют количеством силовых линий результирующего поля, проходящих через площадь в 1 см^2 в намагниченной среде (площадь следует брать перпендикулярно к магнитным силовым линиям). За единицу измерения магнитной индукции в абсолютной электромагнитной системе единиц принят гаусс. Гаусс — это такая магнитная индукция, при которой через площадь в 1 см^2 в намагниченной среде проходит одна магнитная силовая линия.

Между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля существует зависимость

$$B = \mu H, \quad (47)$$

где μ — некоторый коэффициент, называемый магнитной проницаемостью среды.

Магнитная проницаемость характеризует способность различных сред ориентировать электронные орбиты атомов под действием сил магнитного поля.

В абсолютной электромагнитной системе единиц магнитная проницаемость вакуума принята равной единице. Для парамагнитных тел магнитная проницаемость получается немного больше единицы, а для диамагнитных тел — немного меньше.

В табл. 7 приводятся значения магнитной проницаемости для некоторых парамагнитных и диамагнитных тел.

Таблица 7

Магнитная проницаемость некоторых парамагнитных и диамагнитных тел

Парамагнитные тела	Магнитная проницаемость μ	Диамагнитные тела	Магнитная проницаемость μ
Воздух	1,00000036	Висмут	0,999825
Олово	1,000004	Графит	0,999895
Алюминий	1,000023	Сурьма	0,999937
Платина	1,000364	Серебро	0,999981
Марганец	1,0037	Медь	0,999991

С количественной стороны магнитная проницаемость показывает, во сколько раз результирующее поле в намагниченной среде сильнее или слабее поля, создаваемого током в вакууме. В практической системе единиц магнитная проницаемость определяется как произведение двух величин:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \frac{\text{ОМ} \cdot \text{сек}}{\text{М}}, \quad (48)$$

где $\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7} \frac{\text{ОМ} \cdot \text{сек}}{\text{М}}$ — магнитная проницаемость вакуума;

μ_r — относительная проницаемость среды, представляющая собой отвлеченное число (табл. 7), равное отношению магнитной проницаемости среды к магнитной проницаемости вакуума.

Введение иного числового значения для магнитной проницаемости вакуума в практической системе единиц значительно упрощает отдельные формулы, однако наличие размерности у магнитной проницаемости приводит к иной единице измерения и для магнитной индукции.

Эта единица может быть установлена из формулы

$$B = \mu H.$$

Полагая, что в этой формуле $\mu = 1 \frac{\text{ом} \cdot \text{сек}}{\text{м}}$ и $H = 1 \frac{a}{\text{м}}$, получаем единицу измерения магнитной индукции

$$B = 1 \frac{\text{ом} \cdot \text{сек}}{\text{м}} \frac{a}{\text{м}} = \frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2}.$$

Между этой единицей и гауссом существует соотношение

$$1 \frac{\text{в} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2} = 10^4 \text{ гаусс}.$$

Прямо пропорциональная зависимость между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля ($B = \mu H$) позволяет и магнитную индукцию рассматривать как векторную величину.

§ 39. ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ТЕЛА И ИХ СВОЙСТВА

По величине магнитной проницаемости в особую группу выделены так называемые ферромагнитные тела, к числу которых относятся железо, сталь, чугун, кобальт и никель.

От парамагнитных тел они отличаются, во-первых, тем, что у них магнитная проницаемость намного больше единицы, причем величина ее непостоянна и зависит от величины напряженности магнитного поля, и, во-вторых, тем, что ферромагнитные тела сохраняют остаточный магнетизм, т. е. остаются частично намагниченными и после удаления их из магнитного поля тока. Свойства ферромагнитных тел имеют большое практическое значение. С помощью железа, например, создаются очень сильные магнитные поля в электрических машинах и электрических приборах, явление же остаточного магнетизма используется для изготовления искусственных или постоянных магнитов из высококачественной, закаленной стали.

Впервые детальное исследование свойств ферромагнитных тел было проведено нашим соотечественником профессором Московского университета А. Г. Столетовым (1839—1896 гг.). Столетов установил зависимость между магнитной проницаемостью ферромагнитных тел и напряженностью магнитного поля. Он открыл, что каждому ферромагнитному телу соответствует некоторая максимальная магнитная проницаемость при определенном значении напряженности магнитного поля.

Работы А. Г. Столетова по исследованию ферромагнитных тел имели исключительно большое значение для расчета электрических машин, которые до работ Столетова строились экспериментальным путем, без предварительных математических расчетов.

Метод А. Г. Столетова и до сих пор является основным методом исследования магнитных свойств ферромагнитных тел.

Сущность этого метода заключается в том, что из исследуемого ферромагнитного материала изготавливается образец в виде кольца, на которое накладывается тороид (рис. 54). С помощью потенциометра со средней точкой C через тороид можно пропускать любой по величине и направлению ток. При этом внутри тороида создается магнитное поле, напряженность которого можно вычислить по известной уже нам формуле

$$H = \frac{IW}{l},$$

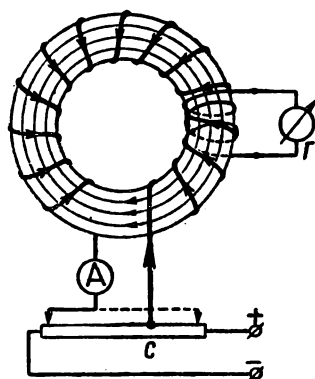


Рис. 54

где l — длина средней магнитной силовой линии в метрах.

Под действием магнитного поля тороида кольцо намагничивается, причем каждому значению напряженности магнитного поля соответствует определенная магнитная индукция в кольце. Для определения ее величины поверх тороида наматывается небольшая катушка, включенная на гальванометр, шкала которого отградуирована в гауссах или в $\frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$. При изменении тока в тороиде в катушке возникнет электродвижущая сила. Под действием электродвижущей силы в гальванометре появится ток, и стрелка прибора отклонится на определенный угол, тем больший, чем сильнее магнитная индукция в кольце в момент изменения тока в тороиде. Это и позволило шкалу гальванометра отградуировать прямо в гауссах (или в $\frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$).

Таким образом, для каждого значения напряженности магнитного поля тороида можно определять и величину магнитной индукции. По данным опыта строят график зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля. На рис. 55, а изображены такие графики для мягкого железа и литой стали. Графики называются также кривыми намагничивания магнитных материалов. По тем же данным опыта определяют значения магнитной проницаемости по формуле $\mu = \frac{B}{H}$

и строят график зависимости этой величины от напряженности магнитного поля. Для мягкого железа и литой стали кривые (графики) магнитной проницаемости изображены на рис. 55, б.

Из кривых следует, что магнитная проницаемость у ферромагнитных тел изменяется в зависимости от напряженности магнитного поля. Наибольшую магнитную проницаемость ферромагнитные тела имеют при сравнительно слабых магнитных

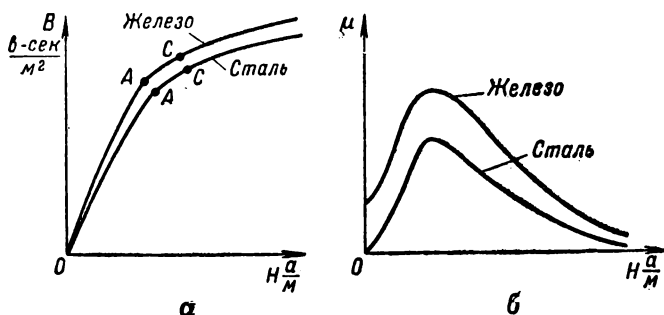


Рис. 55

полях (напряженностях), что очень ценно для практики, так как дает возможность при помощи небольшого тока получать большую магнитную индукцию. Непостоянство магнитной проницаемости у ферромагнитных тел объясняется их внутренней структурой, благодаря которой ориентировка электронных орбит атомов под действием напряженности внешнего поля происходит не одновременно. А так как собственное магнитное поле намагничивающегося ферромагнитного тела создается ориентированными электронами, то можно сказать, что кривые магнитной проницаемости показывают, как происходит нарастание этого поля с увеличением напряженности магнитного поля тока.

Характер кривых намагничивания находится в прямой зависимости от магнитной проницаемости тел. При малых значениях напряженности поля, когда магнитная проницаемость быстро увеличивается, магнитная индукция также быстро растет и этому соответствуют прямолинейные участки кривых намагничивания до точек A, A' (рис. 55, *а*). С началом уменьшения магнитной проницаемости темп роста магнитной индукции резко уменьшается, поэтому прямолинейные участки кривых за точками A, A' переходят в криволинейные. При дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля криволинейные участки опять переходят в прямолинейные за точками C, C' , однако рост магнитной индукции на этих участках получается уже крайне незначительным.

Объясняется это тем, что при напряженностях поля, соответствующих точкам C, C' , ориентировка электронных орбит в теле практически заканчивается, поэтому дальнейший рост магнитной индукции осуществляется главным образом за счет увеличения напряженности. Такое явление, при котором увеличение магнитной индукции в ферромагнитном теле происходит за счет увеличения напряженности магнитного поля, называется магнитным насыщением.

На практике считается, что магнитное насыщение в теле

наступает за точкой A , на участке AC . Использовать магнитную индукцию за точкой C нерационально, так как это требует создания очень сильных магнитных полей, поэтому практически кривые намагничивания используются только до точки C . В этой точке для различных ферромагнитных материалов величина магнитной индукции не превышает 20000 гаусс или $2 \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$.

Сравнивая кривые намагничивания железа и стали, мы видим, что вследствие более высоких значений магнитной проницаемости железо имеет и более высокие магнитные индукции при одних и тех же значениях напряженности поля. Однако железо уступает стали в другом очень важном свойстве, а именно, в остаточном магнетизме. У железа этот магнетизм настолько неустойчив, что им практически пренебрегают.

§ 40. ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА

Различие в остаточном магнетизме железа и стали удобнее всего рассмотреть на кривой, которая называется петлей гистерезиса. Эти кривые, как и кривые намагничивания, получают по методу А. Г. Столетова следующим образом.

Повышая постепенно ток в тороиде, доходят до максимальной магнитной индукции B_m в области магнитного насыщения и строят кривую намагничивания (рис. 56, кривая Oa). После этого ток начинают постепенно уменьшать до нуля и по полученным данным для напряженности поля и магнитной индукции строят кривую ab . Из построений видно, что при уменьшении напряженности магнитного поля магнитная индукция не проходит через свои прежние значения (получается несколько больше) и при напряженности, равной нулю, сохраняет некоторое значение (остаточная магнитная индукция), которое характеризует собой остаточный магнетизм данного ферромагнитного тела.

Таким образом, уменьшение магнитной индукции отстает от уменьшения напряженности поля. Отставание уменьшения магнитной индукции от уменьшения напряженности поля и называется гистерезисом (от греческого слова *hysteresis* — запаздывание). Объясняется гистерезис, а следовательно, и остаточный магнетизм тем, что некоторые электронные

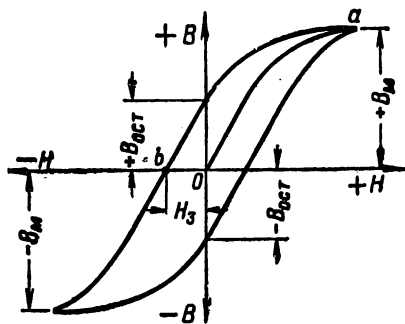


Рис. 56

орбиты атомов остаются ориентированными и после исчезновения внешнего поля благодаря взаимодействию собственных магнитных полей отдельных атомов.

Чтобы размагнитить тело (кольцо), необходимо в тороиде создать магнитное поле обратного направления. Для этого изменяют направление тока в тороиде, передвигая ползунок потенциометра в противоположную сторону от средней точки C (рис. 54), и начинают его постепенно повышать от нуля, занося в таблицу значения напряженности и магнитной индукции.

При некоторой напряженности H_z , называемой задерживающей, или коэрцитивной, силой, магнитная индукция становится равной нулю и тело размагничивается. Если после этого продолжать увеличивать напряженность поля (увеличением тока в тороиде), то тело опять начнет намагничиваться, но уже в другом направлении. По достижении максимальной магнитной индукции — B_m можно опять уменьшать напряженность до нуля и получить остаточный магнетизм с отрицательным значением индукции. Наконец, изменив направление поля и повысив его напряженность, тело можно снова размагнитить (при $+H_z$) и намагнитить в первоначальном направлении.

Коэрцитивная сила (H_z) характеризует собой устойчивость остаточного магнетизма в теле. Чем эта сила больше, тем устойчивее получается остаточный магнетизм.

Построенная на рис. 56 замкнутая кривая — петля гистерезиса — получается за один полный цикл перемагничивания тела.

При перемагничиваниях тело нагревается. Это происходит вследствие столкновений ориентированных электронов со свободными электронами тела. **Потери энергии на нагревание тела при его частых перемагничиваниях, покрываемые за счет энергии источника, питающего тороид, носят название потерь на гистерезис, или на перемагничивание.** Эти потери пропорциональны площади, заключенной внутри петли гистерезиса.

На рис. 57, а изображены кривые гистерезиса для железа и стали. Кривые наглядно показывают различие в свойствах этих двух тел. Максимальная магнитная индукция у железа больше, чем у стали, остаточный магнетизм у обоих тел примерно одинаковый. Что же касается коэрцитивной силы, то она у железа значительно меньше, чем у стали, поэтому у железа остаточный магнетизм очень неустойчив, или, как говорят, очень непрочен.

Различия в свойствах железа и стали определяют и область их применения. Сталь применяется там, где требуется значительный остаточный магнетизм (например, для изготовления постоянных магнитов) и нет перемагничивания, так как потери на гистерезис у стали гораздо больше, чем

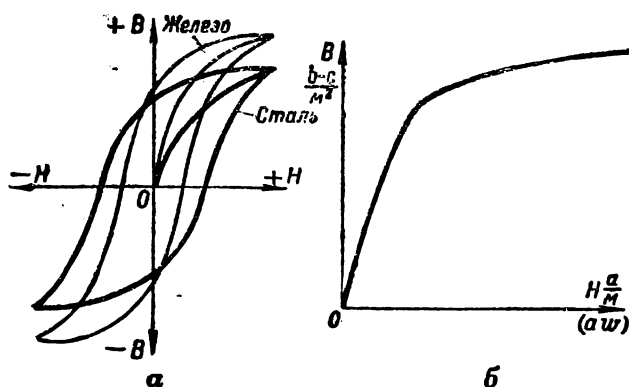


Рис. 57

у железа (это видно из сравнения площадей, ограниченных кривыми). Железо применяется для создания сильных магнитных индукций при сравнительно малых значениях напряженности магнитного поля.

Практический интерес для расчета магнитных полей в электрических машинах и приборах представляют кривые намагничивания. Для удобства пользования этими кривыми по горизонтальной оси откладывают не напряженность магнитного поля в амперах на метр, а так называемые удельные ампер-витки aw (рис. 57, б). В формуле (46) $H = \frac{IW}{l}$ произведение IW называется полными ампер-витками. Такое число витков необходимо иметь в тороиде, чтобы получить нужную магнитную индукцию в испытуемом образце. Число же ампер-витков, приходящееся на единицу длины (т. е. на один метр) средней магнитной силовой линии в тороиде, называется удельными ампер-витками. На основе этого определения для удельных ампер-витков можно написать

$$aw = \frac{IW}{l}. \quad (49)$$

Из этой формулы находим

$$IW = l aw. \quad (50)$$

Подставив в формулу $H = \frac{IW}{l}$ значение полных ампер-витков, получим

$$H = aw,$$

или

$$aw = H \frac{\text{ампер}}{\text{метр}}. \quad (51)$$

Таким образом, удельные ампер-витки численно равны напряженности, выраженной в амперах на метр.

§ 41. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИБОРАХ И МАШИНАХ

Из числа магнитных материалов, применяемых в электро-технике, наибольшее распространение получили ферромагнитные материалы.

Все эти ферромагнитные материалы в зависимости от величины коэрцитивной силы принято делить на магнитотвердые и магнитомягкие.

Магнитотвердые материалы характеризуются большими значениями коэрцитивной силы и высоким остаточным магнетизмом. К этим материалам относятся высококачественные стали. Из магнитотвердых материалов изготавливаются постоянные магниты, которые широко применяются в электротехнике и радиотехнике. Основные характеристики наиболее употребительных магнитотвердых материалов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Основные характеристики некоторых магнитотвердых материалов

Название материала	Остаточная магнитная индукция в гауссах	Коэрцитивная сила в эрстедах
Углеродистая сталь	12 000	25—35
Вольфрамовая сталь	10 000	60
Хромистая сталь	9 000	60
Кобальтовая сталь	9 000	130
Магнито	12 000	650

Из таблицы видно, что наиболее высокими магнитными свойствами обладает сплав магнито. Магнито значительно уменьшает габариты постоянных магнитов и удешевляет их стоимость по сравнению с магнитами из других сталей.

Магнитомягкие материалы отличаются от магнитотвердых малыми значениями коэрцитивной силы и высокой максимальной магнитной проницаемостью. Эти материалы подразделяются на низкочастотные, применяемые на низких частотах, и высокочастотные, применяемые на высоких частотах. Единицей измерения частоты тока служит герц (гц). Герц — это частота, при которой в секунду происходит одно перемагничивание тела. Низкими считаются частоты до десятков тысяч герц, а высокими — от миллионов герц и выше.

Низкочастотные материалы выпускаются промышленностью в виде стальных листов толщиной 0,2—0,5 мм. Применяются они для изготовления сердечников трансформаторов, катушек и якорей электрических машин. Данные наиболее употребительных низкочастотных материалов приведены в табл. 9.

Таблица 9

Данные некоторых низкочастотных материалов

Название материала	Максимальная магнитная проницаемость (в абсолютной системе единиц)	Магнитная индукция насыщения в гауссах	Коэрцитивная сила в эрстедах
Листовая электротехническая сталь Э4АА	14 400	18 700	1,0
Сталь Э1ААБ	15 400	20 000	1,0
Сталь Армко	7 000	18 000	0,9—1,15
Пермаллой	75 000	11 000	0,05

Цифры и буквы в марках сталей означают: Э — электротехническая сталь; А — сталь с повышенным удельным сопротивлением; АА — сталь с особенно низкими потерями (на перемагничивание); Б — сталь с повышенной магнитной индукцией; цифры указывают содержание в стали кремния в процентах (за счет содержания кремния изменяются электрические свойства стали, см. § 53).

Сталь Армко, иначе называемая советским железом Армко, имеет малое количество примесей, не превышающее 0,16%.

Пермаллой представляет собой сплав железа и никеля (30—85% никеля). Основное свойство пермаллоя состоит в том, что у него очень высокая магнитная проницаемость при слабых магнитных полях. При специальной обработке проницаемость пермаллоя доходит до 200 000 единиц (по абсолютной электромагнитной системе).

На высоких частотах указанные в табл. 9 материалы не применяются из-за больших потерь на перемагничивание.

Высокочастотные материалы называют иначе магнитодиэлектриками. Эти материалы изготавливаются из мелких, измеряемых микронами, зерен магнитных материалов. Зерна связываются между собой при помощи изолирующих смол (отсюда и название магнитодиэлектрики). Из полученной смеси при определенной температуре прессуют сердечники для всевозможных катушек, применяемых в радиоаппаратуре.

Основные свойства магнитодиэлектриков — малые потери в них на перемагничивание и практически постоянная величина магнитной проницаемости, что очень важно для радиотехнических устройств. Наиболее употребительные магнитодиэлектрики — прэльфер, радиофер, прессперм, альсифер, прессованный магнетит и прессованное карбонильное железо.

Прэльфер изготавливают из порошкообразного электролитического железа. Зерна железа сначала покрывают окисью цинка, а затем шеллаком. Из зерен путем прессовки под высоким давлением (9—10 т/см²) изготавливают сердечники для катушек.

Радиофер также изготавливают из порошкообразного электролитического железа, однако зерна порошка изолируют друг от друга бакелитовой смолой. Детали из радиофера прессуют в горячих формах.

Прессперм представляет собой порошкообразный пермаллой, смешанный с теплостойкой изолирующей массой. Из смеси прессуют детали, которые затем отжигают в специальных печах.

Альсифер изготавливают из порошкообразного альсифера, представляющего собой сплав железа, алюминия и кремния. Зерна порошка смешивают с изолирующей массой и из смеси прессуют детали.

Прессованный магнетит делают из мелких зерен минерала магнетита $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. Зерна смешивают с бакелитовой смолой и прессуют при определенной температуре.

Прессованное карбонильное железо $\text{Fe}(\text{CO})_5$ изготавливают из порошка этого железа в смеси с бакелитовой смолой. Детали из смеси прессуют при определенной температуре.

Каждый из этих магнитодиэлектриков обладает специфическими особенностями, позволяющими использовать его при тех или иных высоких частотах.

За последнее время широкое распространение получили новые магнитомягкие материалы — ферриты. В химическом отношении эти материалы представляют собой соединения окислов железа с никелем, цинком и другими металлами.

Для изготовления сердечников материалы предварительно размалываются в порошок на железных шаровых мельницах, а затем прессуются и отжигаются.

Основное свойство ферритов — незначительные потери на вихревые токи при высоких частотах (порядка 10^5 герц).

§ 42. МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ И МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Магнитной цепью в электрических приборах и машинах называется путь, по которому проходят в них магнитные силовые линии. На рис. 58 изображена магнитная цепь, состоящая из двух последовательных участков: участка по железному сердечнику и воздушного участка. Устройство, создающее магнитное поле в данном электрическом приборе или в машине, называется магнитной системой. В магнитную систему, изображенную на рис. 58, входят сердечник из ферромагнитного материала и намагничивающая катушка. Катушка изготавливается из медной изолированной проволоки, наложенной на картонное основание (рис. 59, а).

Магнитная цепь называется простой, если ее магнитные силовые линии нигде не разветвляются (рис. 58). Если же

цепь состоит из двух и большего числа параллельных ветвей, такая цепь называется сложной (рис. 59, б).

Магнитные силовые линии, образующие магнитную цепь, принято называть магнитным потоком. Магнитный поток обозначается буквой Φ . Магнитный поток можно изображать вектором, как величину, имеющую вполне определенное направление в пространстве. Вектор магнитного потока на чертежах необходимо располагать так, чтобы он совпадал с осью магнитного потока и был направлен по силовым линиям (рис. 58).

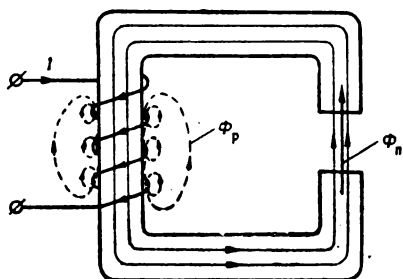


Рис. 58

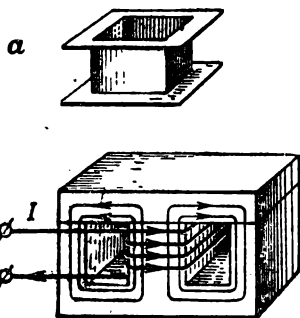


Рис. 59

Следует различать полезный магнитный поток Φ_n и магнитный поток утечки, или рассеяния, Φ_p . Полезный магнитный поток всеми своими силовыми линиями проходит по всем участкам цепи, т. е. как по сердечнику, так и по воздушному зазору. На практике этот поток для работы обычно используется на участке воздушного зазора. Так, например, если в воздушный зазор перпендикулярно к силовым линиям поместить проводник с током, то проводник начнет перемещаться.

Поток рассеяния ответвляется от главной магнитной цепи и замыкается по воздуху. Силовые линии потока рассеяния на рис. 58 показаны пунктиром. Поток рассеяния приводит к ослаблению магнитной индукции в воздушном зазоре, поэтому при расчетах магнитной цепи его необходимо учитывать.

Для учета потока служит коэффициент утечки, или коэффициент рассеяния

$$\sigma = \frac{\Phi_n + \Phi_p}{\Phi_n} = \frac{\Phi}{\Phi_n}, \quad (52)$$

где $\Phi = \Phi_n + \Phi_p$ — полный магнитный поток, создаваемый в магнитной системе;

Φ_n — полезный магнитный поток;

Φ_p — магнитный поток рассеяния.

Числовое значение коэффициента утечки зависит от длины воздушного зазора и колеблется от 1,1 до 1,6. Чем больше длина воздушного зазора, тем больше берется и коэффициент утечки, так как большее число силовых линий будет замыкаться по воздуху, минуя сердечник.

Величина полезного магнитного потока через любое поперечное сечение простой магнитной цепи везде одинакова.

Единицей измерения магнитного потока в абсолютной системе единиц служит максвелл. Максвелл — это такой магнитный поток, при котором через поперечное сечение магнитной цепи проходит одна магнитная силовая линия. Если известны магнитная индукция в сердечнике и площадь его поперечного сечения, то магнитный поток в цепи можно определить по формуле

$$\Phi = BS \text{ максвелл,} \quad (53)$$

где B — магнитная индукция в гауссах;

S — площадь поперечного сечения сердечника в квадратных сантиметрах.

В практической системе единиц магнитный поток измеряется в вольт-секундах. Для получения этой единицы измерения подставим в формулу (53) значения магнитной индукции и площади поперечного сечения сердечника в практических единицах:

$$\Phi = BS \frac{\text{в-сек} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2}.$$

После сокращения на м^2 получим

$$\Phi = BS \text{ в-сек.}$$

Между вольт-секундой и максвеллом существует зависимость: $1 \text{ в-сек} = 10^8 \text{ максвелл.}$

§ 43. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ И ИХ ТЕХНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

Простейшим электромагнитом является соленоид, однако его нерационально использовать из-за слабого собственного поля. На практике обычно применяют электромагниты, состоящие из намагничивающей катушки и вставленного в нее железного сердечника. При пропускании тока через катушку сердечник намагничивается, поэтому в приборе создается сильное магнитное поле, во много раз превосходящее поле соленоида.

В зависимости от формы сердечника электромагниты делятся на стержневые (рис. 60, а), подковообразные (рис. 60, б) и Ш-образные (рис. 60, в). Катушки электромагнитов изготовляются из медной изолированной проволоки, а сердечники —

из мягкого железа (стали), обладающего высокой магнитной проницаемостью. Обычно всякий электромагнит, используемый для практических целей, воздействует на железный якорь (притягивает его), который при выключении тока или его уменьшении размагничивается вместе с сердечником и под действием пружины возвращается в начальное положение.

Электромагниты характеризуются подъемной силой, т. е. силой, с которой они удерживают притянутый к сердечнику якорь. Подъемная сила электромагнита определяется по формуле

$$F = \frac{B^2 S \cdot 10^7}{8\pi} \text{ ньютон,} \quad (54)$$

где B — магнитная индукция в сердечнике в $\frac{\text{вб}}{\text{см}^2}$;

S — площадь прилипания (или касания) якоря к сердечнику в квадратных метрах.

Из трех приведенных электромагнитов наибольшей подъемной силой (при одинаковых габаритах) обладает Ш-образный электромагнит, у которого площадь прилипания якоря к сердечнику наибольшая.

Электромагниты получили большое распространение. Особенно широко они применяются в электромагнитных реле, которые производят различные переключения в электрических цепях. По способу включения в электрическую цепь реле делятся на токовые реле и реле напряжения.

Токовые реле включаются последовательно с приемниками, которые они обслуживают, и срабатывают при изменении тока в приемниках. Реле используются только для выключения приемников, так как после срабатывания их катушки обесточиваются и поэтому самостоятельно производить включения они не могут.

В зависимости от величины тока, при котором токовые реле срабатывают, они делятся на минимальные и максимальные. Минимальные токовые реле выключают приемник при некотором наименьшем токе в цепи, а максимальные — при наибольшем. Максимальные реле чаще всего выполняют роль предохранителей в цепи, минимальные же реле применяются при особых режимах работы приемников, например при заряде аккумуляторов от генератора постоянного тока,

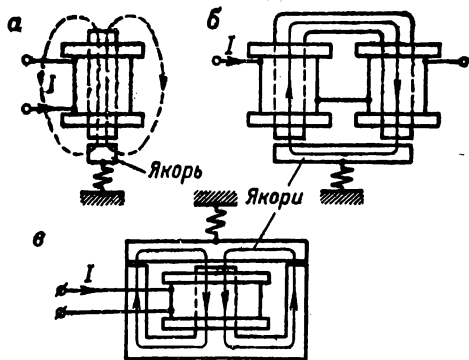


Рис. 60

Реле напряжения включаются параллельно с приемниками и срабатывают при изменении напряжения на зажимах приемников. Вследствие самостоятельного питания намагничивающей катушки реле напряжения могут как включать, так и выключать приемники.

Независимо от назначения каждое реле состоит из электромагнита, якоря с регулируемой пружиной и контактов для замыкания или размыкания цепи.

На рис. 61 изображено минимальное токовое реле, применяемое в электрических схемах для заряда аккумуляторов. Намагничивающая катушка реле одним своим концом припаяна к сердечнику электромагнита, который вместе с якорем используется в качестве токоведущей части. Якорь с сердечником соединен шарнирно или гибкой металлической пластиной. Контакт K_1 для замыкания цепи аккумулятора смонтирован на якоре, контакт K_2 изолированно укреплен на сердечнике. Контакты изготавливаются из тугоплавкого металла (например, вольфрама).

При замкнутой цепи, когда ток больше минимального тока, на который отрегулирована пружина реле, якорь притянут к сердечнику и надежно соединяет контакты K_1 и K_2 . В случае уменьшения тока до минимального магнитный поток в сердечнике также уменьшается. В результате якорь слабее притягивается к сердечнику, а потому отрывается от него пружиной. Контакты K_1 и K_2 размыкаются, и ток в цепи прекращается, т. е. реле срабатывает.

Реле напряжения изображено на рис. 62. Намагничивающая катушка реле, как видно из рисунка, соединена параллельно с аккумулятором. Контакты K_1 и K_2 изолированы от якоря и сердечника. В зависимости от натяжения пружины реле включает и выключает цепь аккумулятора при определенных значениях напряжения на зажимах генератора.

Недостаток реле напряжения состоит в том, что оно включает и выключает аккумулятор независимо от величины и направления тока в нем.

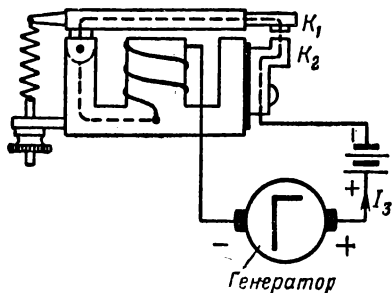


Рис. 61

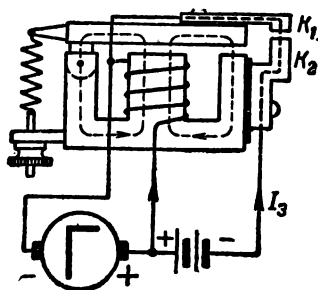


Рис. 62

По типу реле напряжения изготавливаются разнообразные реле, применяемые в телефонии и радиолокационной аппаратуре. На рис. 63 изображена одна из конструкций таких реле. При увеличении тока в намагничивающей катушке якорь притягивается к сердечнику и замыкает контакт между двумя тонкими металлическими пластинками *a* и *b*. Пластины с помощью выводов включаются в разрыв цепи, контролируемой реле. Изменением натяжения пружины (с помощью винта и гайки) регулируется чувствительность реле, т. е. устанавливается минималь-

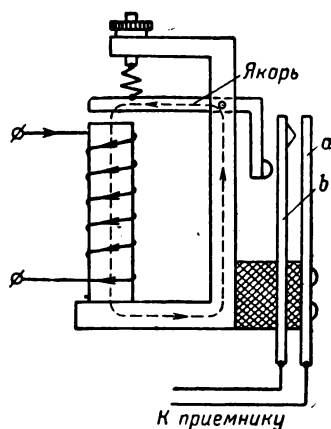


Рис. 63

ный ток, при котором реле включает цепь приемника.

Для дистанционного включения и выключения электрических цепей с большими токами (обычно цепей, питающих электрические двигатели) применяются особые выключатели, называемые контакторами. На рис. 64, *a* изображен однополюсный контактор постоянного тока, состоящий из двух пружинящих контактов K_1 и K_2 и стержневого электромагнита M . Контакт K_2 крепится изолированно на якоре электромагнита и гибким проводником соединен с выводным зажимом контак-

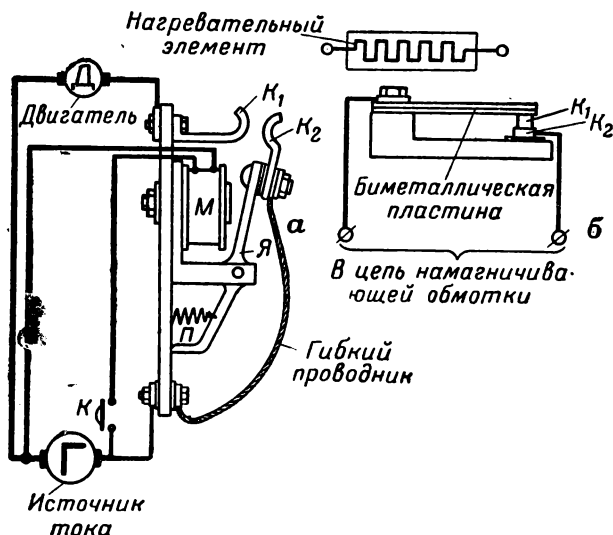


Рис. 64

тора. Все части прибора смонтированы на основании из изоляционного материала (мрамора или шифера).

При отсутствии тока в намагничивающей обмотке электромагнита M , когда кнопка K выключена, контакты K_1 и K_2 под действием пружины P остаются разомкнутыми, поэтому ток через приемник не проходит. Для включения приемника достаточно замкнуть цепь обмотки электромагнита, нажав кнопку K . При этом якорь притягивается к сердечнику и приводит в соприкосновение контакты K_1 и K_2 прибора.

Обмотка электромагнита питается от того же источника, что и приемник, обслуживаемый контактором.

У двухполюсных контакторов имеется два неподвижных контакта и два подвижных, изолированно укрепленных на якоре электромагнита.

Контакторы выполняются как для постоянного, так и для переменного тока на токи до 600 a . При постоянном токе контакторы применяются для напряжений до 3000 v , а при переменном — до 500 v .

Одно из преимуществ контакторов перед обычными рубильниками заключается в том, что они выдерживают очень большое число включений и выключений (20—50 млн.). Мощность, потребляемая намагничивающими обмотками электромагнитов, не превышает десятков ватт (обмотки изготавливаются многовитковыми, из тонкой изолированной проволоки, поэтому потребляют незначительные токи).

Иногда последовательно с намагничивающей обмоткой контактора включают тепловое реле, которое в случае перегрузки двигателя автоматически отключает его от источника тока. Принцип работы и устройство такого реле поясняет рис. 64, б. Основной частью реле является биметаллическая пластина, состоящая из двух сваренных между собой пластинок, изготовленных из разных металлов (пластинки свариваются по всей их длине). Один конец биметаллической пластины прикреплен неподвижно к основанию реле, а второй имеет контакт K_1 , который соприкасается с другим контактом K_2 , также укрепленным на основании (изолированно).

Вследствие различных коэффициентов линейного расширения пластинок они при нагревании начинают выгибаться (в сторону пластины с меньшим коэффициентом) и этим самым размыкают контакты реле, а следовательно, и цепь намагничивающей обмотки контактора. Контактор срабатывает и отключает двигатель от источника.

Для нагревания биметаллической пластины служит нагревательный элемент из нихромовой проволоки, навитой на micaнитовое основание. Элемент укреплен на реле вблизи от пластины и включается последовательно с двигателем, поэтому питается с ним одним и тем же током. Мощность элемента, а также его удаление от пластины подбираются с та-

ким расчетом, чтобы выгибание пластины начиналось лишь при перегрузке двигателя, т. е. при токе, опасном для изоляции обмоток.

Выключение двигателя тепловым реле является сигналом для обслуживающего персонала, который обязан выключить цепь намагничивающей обмотки контактора и установить причину перегрузки двигателя.

После остывания биметаллическая пластина выпрямляется и вновь замыкает контакты реле.

§ 44. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ

Физические процессы в проводнике с током, находящемся в магнитном поле, подробно рассматривались в § 36. Поэтому сейчас остановимся лишь на величине силы, вызывающей движение проводника.

Опытом установлено, что величина силы, действующей на проводник в магнитном поле (рис. 65), может быть определена по формуле

$$F = BIl \sin \alpha \text{ ньютон,} \quad (55)$$

где B — магнитная индукция поля в $\frac{\text{вб-сек}}{\text{м}^2}$;

I — величина тока, проходящего по проводнику, в амперах;

l — активная длина¹ проводника в метрах;

α — угол, образуемый проводником с магнитными силовыми линиями.

Из формулы следует, что наибольшее значение сила, действующая на проводник с током, принимает при $\alpha = 90^\circ$, т. е. когда проводник располагается в поле перпендикулярно к магнитным силовым линиям и при своем движении как бы пересекает их. Наоборот, сила становится равной нулю, когда проводник располагается в поле вдоль магнитных силовых линий ($\alpha = 0$). Отсутствие силы взаимодействия между полем и током проводника в этом случае объясняется тем, что свободные электроны в проводнике движутся вдоль магнитных силовых линий и поэтому не испытывают на себе действия сил поля (§ 36).

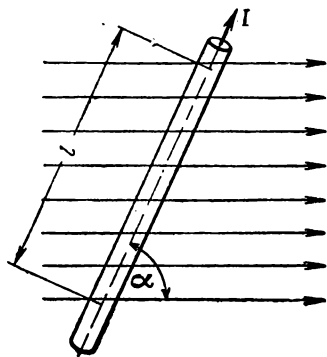


Рис. 65

¹ Активной длиной проводника называется та часть его длины, которая находится в магнитном поле.

По правилу левой руки сила F направлена перпендикулярно к чертежу, поэтому на рис. 65 не может быть показана.

На практике часто используется сила взаимодействия двух параллельных проводников, находящихся под током. Каждый из двух таких проводников можно рассматривать как проводник, помещенный в магнитное поле другого проводника (рис. 66).

Обозначим через l (в метрах) длину проводников, а через d (в метрах) — расстояние между ними. Будем считать, что проводники расположены в воздухе. Силу взаимодействия каждого проводника с магнитным полем другого проводника можно определить по формуле

$$F = BIl \sin \alpha \text{ ньютон.}$$

Но $\sin \alpha$ в нашем случае равен единице, так как каждый проводник расположен перпендикулярно к магнитным силовым линиям другого проводника. Согласно формуле сила, действующая на первый проводник,

$$F_1 = I_1 B_2 l,$$

где B_2 — магнитная индукция поля, создаваемого вторым проводником в месте расположения первого проводника.

Величину этой магнитной индукции в нашем случае можно принять равной напряженности магнитного поля, умноженной на магнитную проницаемость вакуума (по условию проводники расположены в воздухе), т. е.

$$B_2 = \mu_0 H_2 = \frac{I_2}{2\pi d} 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}.$$

Подставив значение B_2 в формулу $F_1 = I_1 B_2 l$, получим

$$F_1 = \frac{2I_1 I_2 l}{d} \cdot 10^{-7} \text{ ньютон.}$$

Аналогично можно вывести такую же формулу и для силы F_2 , действующей на второй проводник. Действительно, для второго проводника

$$F_2 = I_2 B_1 l.$$

Но

$$B_1 = \mu_0 H_1 = \frac{I_1}{2\pi d} 4\pi \cdot 10^{-7},$$

тогда

$$F_2 = \frac{2I_1 I_2 l}{d} \cdot 10^{-7} \text{ ньютон.}$$

Таким образом, сила взаимодействия между двумя параллельными проводниками (с токами) определяется формулой

$$F = \frac{2I_1 I_2 l}{d} \cdot 10^{-7} \text{ ньютон,} \quad (56)$$

где I_1 и I_2 — величины токов в проводниках в амперах;
 l — длина, на протяжении которой взаимодействуют проводники, в метрах;
 d — расстояние между проводниками в метрах.

Направление сил определяется по известному уже нам правилу левой руки. Применяя это правило в нашем случае, можно установить, что между проводниками, имеющими ток одного направления, действуют силы притяжения. Если в одном из проводников изменить направление тока, то и силы изменят свое направление на противоположное; следовательно, проводники с токами разного направления отталкиваются.

§ 45. АБСОЛЮТНАЯ ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ МКСА

В соответствии с указанием Комитета по делам мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР (№ 4310 от 7 января 1950 г.) в Советском Союзе принята новая, единая система единиц для измерения величин, используемых в различных отраслях науки. Эта система называется абсолютной практической электромагнитной системой МКСА. В качестве основных единиц в системе МКСА взяты метр, килограмм, секунда и ампер; единицы для измерений других величин являются производными от основных.

Необходимость перехода на единую систему единиц измерения вызвана тем, что применение различных систем создавало неудобства при переходе от одних единиц к другим как при пользовании учебной литературой, так и при разного рода вычислениях.

В конце учебника в приложении дано определение единиц измерения по системе МКСА, приведены соотношения между некоторыми единицами этой, а также других систем. Соотношения между единицами измерения показывают, что большая часть единиц измерения электрических величин по системе МКСА таких, как джоуль, ватт, ампер, кулон, вольт, ом, фарада, очень незначительно отличается по величине от аналогичных единиц практической международной системы единиц.

Исключение составляют вольт-секунда, $\frac{\text{вольт-секунда}}{\text{метр}^2}$ и $\frac{\text{ампер}}{\text{метр}}$, которые намного отличаются от соответствующих единиц абсолютной электромагнитной системы единиц.

Одна из четырех основных единиц системы МКСА, а именно ампер, служит для измерения величины тока. Ампер по системе МКСА установлен на основе формулы

$$F = \frac{2I_1 I_2 l}{d} \cdot 10^{-7},$$

определяющей силу взаимодействия между двумя параллельными проводниками с токами. Согласно этой формуле ампер — это величина такого тока, который, проходя по каждому из двух параллельных проводников ничтожно малого поперечного сечения, расположенных на расстоянии двух метров один от другого в вакууме, создает между этими проводниками на каждый метр их длины силу взаимодействия, равную одной десятиллионной доле ньютона. В физическом отношении ампер есть величина такого тока, при котором через поперечное сечение цепи проходит в секунду один кулон электричества.

Система МКСА имеет свои положительные и отрицательные стороны. Достоинство системы в том, что при ней значительно упрощается ряд формул. Так, по старой практической системе единиц (международной) сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле, определяется формулой

$$F = 10,2BIl \cdot 10^{-8} \text{ килограммов.}$$

По системе же МКСА аналогичная формула имеет более простой вид

$$F = BIl \text{ ньютон.}$$

Недостаток системы в том, что при ней почти невозможно истолковать физический смысл отдельных ее единиц измерения. К таким единицам следует отнести $\frac{\text{ом} \cdot \text{секунда}}{\text{метр}}$ для магнитной проницаемости вакуума, $\frac{\text{вольт} \cdot \text{секунда}}{\text{метр}^2}$ для магнитной индукции и некоторые другие.

Б. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 46. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Явление электромагнитной индукции было открыто в 1831 году английским ученым Фарадеем. Сущность этого явления (§ 36) заключается в том, что силы магнитного поля вызывают электризацию концов проводника, превращая его в источник электрической энергии. **Электродвижущие силы и токи, возникающие в результате электромагнитной индукции, называются индуцированными.**

Известно (§ 4), что электризация тел сопровождается расходом энергии внешних сил, перемещающих свободные электроны (или единичные заряды) против направления действия сил электрического поля. Внешними силами, возникающими в проводнике при его движении в магнитном поле, и являются силы F_m этого поля (§ 36). Как видно из рис. 67, *а*, эти силы, смещая свободные электроны в проводнике влево, приводят к появлению в нем электрического поля (силовые линии поля показаны пунктиром). Для преодоления сил электрического поля силы магнитного поля расходуют энергию,

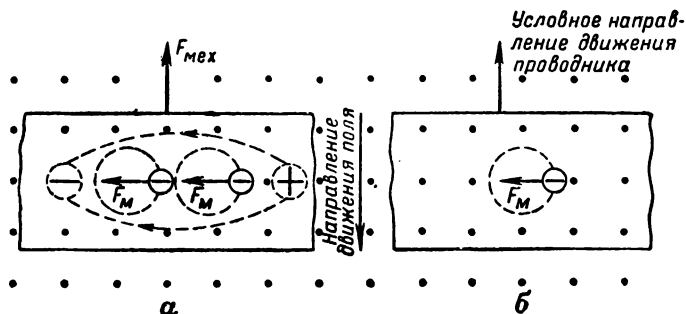


Рис. 67

которая подводится к проводнику извне для сообщения ему механического движения (силой $F_{мех}$). Энергия, расходуемая силами магнитного поля на перемещение единичного заряда, переходит в энергию электрического поля проводника и составляет его электродвижущую силу.

Таким образом, явление электромагнитной индукции дает возможность превращать механическую энергию в электрическую. В § 36 отмечалось, что магнитное поле действует только на движущиеся электроны, в результате чего и происходит электризация концов проводника при движении его в магнитном поле. Однако опыт показывает, что электродвижущая сила возникает в проводнике и в том случае, если проводник находится в покое, а движется магнитное поле, как бы пересекая его при этом своими магнитными силовыми линиями.

Объясняется это тем, что при всяком движении или изменении магнитного поля в нем возникает добавочное электрическое поле (электродинамического происхождения), под действием которого и осуществляется электризация концов неподвижного проводника.

Следовательно, для возникновения электродвижущей силы в проводнике не имеет значения, движется ли проводник относительно магнитного поля или магнитное поле движется

относительно проводника. В дальнейшем, чтобы установить направление смещения свободных электронов в неподвижном проводнике при движении относительно него магнитного поля, будем считать условно, что магнитное поле неподвижно, а проводник движется в нем в противоположном направлении (рис. 67, б).

Исходя из опыта, а также из представления о магнитных силовых линиях, первые исследователи магнитного поля дали такую формулировку закона электромагнитной индукции: **во всяком проводнике, который пересекает магнитные силовые линии или сам пересекается ими, индуцируется электродвижущая сила.** Этот закон можно сформулировать еще и так: **во всяком замкнутом контуре, в котором изменяется магнитный поток, сцепленный с этим контуром, индуцируется электродвижущая сила.**

Второй формулировкой удобней пользоваться при вычислениях. Однако в этой формулировке не говорится об основном условии для получения индуцированных электродвижущих сил—о необходимости взаимного пересечения проводника и магнитных силовых линий поля. Под сцепленным потоком понимается такой поток, магнитные силовые линии которого проходят внутри витков, образующих контур.

Рассматривая магнитные силовые линии как замкнутые кривые, мы должны прийти к выводу, что всякое изменение магнитного потока, сцепленного с контуром, неизбежно сопровождается пересечением контура магнитными силовыми линиями этого потока.

Для определения направления индуцированных электродвижущих сил и токов наряду с правилом правой руки можно пользоваться и правилом Ленца. Это правило формулируется так: **индуцированные электродвижущие силы и токи в проводнике всегда направлены так, что противодействуют причине, их вызывающей.**

Рассмотрим несложный пример на применение правила Ленца. Пусть замкнутый виток находится во внешнем магнитном поле и с ним сцеплен некоторый магнитный поток, уменьшающийся по времени. Определим направление индуцированного тока в витке. В данном случае причиной возникновения тока является уменьшение магнитного потока, сцепленного с витком. Для противодействия этому уменьшению индуцированный ток должен создать внутри витка магнитное поле одинакового направления с магнитным потоком. Таким образом, индуцированный ток будет как бы поддерживать неизменным сцепленный с витком магнитный поток. Зная направление магнитного поля тока, по правилу буравчика можно определить и направление самого тока.

Нетрудно понять, что при увеличении магнитного потока, сцепленного с витком, картина получится обратная.

Для противодействия увеличению магнитного потока поле, создаваемое индуктированным током, должно быть направлено прямо противоположно этому потоку.

Пользуясь правилом Ленца, всегда можно определить и направление индуктированной электродвижущей силы, поскольку она имеет одинаковое направление с током.

§ 47. ВЕЛИЧИНА ИНДУКТИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

Величина индуктированной электродвижущей силы в проводнике равна (в абсолютных электромагнитных единицах) числу пересечений проводника с магнитными силовыми линиями в секунду. Если же исходить из второй формулировки закона электромагнитной индукции (§ 46), то можно сказать, что величина индуктированной электродвижущей силы в контуре численно равна скорости изменения магнитного потока, сцепленного с контуром. Под скоростью изменения магнитного потока нужно понимать увеличение или уменьшение его в секунду. А так как всякое изменение магнитного потока, сцепленного с контуром, приводит к пересечениям контура магнитными силовыми линиями, то скорость изменения магнитного потока получается равной числу этих пересечений в секунду.

Скорость изменения магнитного потока аналогична скорости механического движения тела, а магнитный поток, сцепленный с контуром, аналогичен пути, который проходит тело при своем движении. При равномерном движении тела график его пути в зависимости от времени изображается прямой линией, а для случая неравномерного движения график пути имеет вид кривой линии.

Для определения скорости неравномерного движения тела в отдельные промежутки времени ось времени разбивают на столь малые одинаковые участки Δt , что криволинейные отрезки графика пути можно принять за прямолинейные, т. е. соответствующие равномерному движению тела. Для каждого участка Δt находят соответствующий ему путь ΔS по графику, а затем и скорость движения тела по формуле

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t}.$$

Скорость изменения магнитного потока, сцепленного с контуром, определяется такими же способами, как и скорость движения тела.

На рис. 68, а изображен график изменения магнитного потока, сцепленного с контуром, в зависимости от времени. На основании графика можно утверждать, что магнитный поток

при своем увеличении изменяется равномерно, т. е. на одинаковое число магнитных силовых линий в секунду.

По аналогии со скоростью движения тела скорость изменения магнитного потока математически обозначается через $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, где $\Delta\Phi$ — небольшое равномерное изменение магнитного потока, сцепленного с контуром, в максовеллах (или в вольт-секундах), Δt — малое время (в секундах), в течение которого происходит изменение потока.

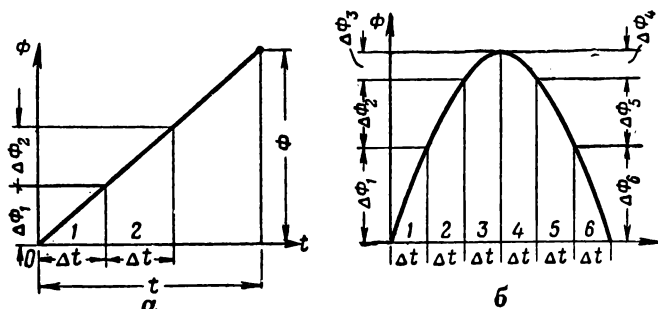


Рис. 68

Как и для случая равномерного движения тела, скорость изменения магнитного потока согласно графику, изображенному на рис. 68, а, остается постоянной, поэтому может быть вычислена по формуле

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi}{t}, \quad (57)$$

где Φ — величина магнитного потока, сцепленного с контуром в рассматриваемый момент времени;

t — время, в течение которого происходило изменение магнитного потока (в данном случае его увеличение).

При неравномерном изменении магнитного потока, сцепленного с контуром, скорость его изменения различна и для отдельных промежутков времени Δt определяется отношением $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. График неравномерного изменения магнитного потока, сцепленного с контуром, изображен на рис. 68, б. Из графика видно, что магнитный поток сначала нарастает от нуля до некоторой наибольшей величины, а затем уменьшается до нуля.

Для определения скорости изменения магнитного потока в отдельные промежутки времени поступаем так же, как и при определении скорости движения тела при неравномерном движении, т. е. разбиваем ось времени на одинаковые участки Δt , а криволинейный график превращаем в прямолинейные отрезки.

Построения, сделанные на рис. 68, показывают, что скорость изменения магнитного потока сначала (первая половина графика) уменьшается от наибольшей своей величины $\frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t}$ до величины $\frac{\Delta\Phi_3}{\Delta t}$, а затем (вторая половина графика) увеличивается до значения $\frac{\Delta\Phi_6}{\Delta t} = \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t}$.

Имея график изменения магнитного потока, сцепленного с контуром, всегда можно найти скорость изменения потока в течение интересующего нас промежутка времени Δt . Если известны скорость изменения магнитного потока, сцепленного с контуром, и число витков в контуре, то величина индуцированной электродвижущей силы в витках контура может быть определена по формуле

$$e = - W \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ вольт,} \quad (58)$$

где $\Delta\Phi$ — равномерное изменение магнитного потока в вольт-секундах;

Δt — время, в течение которого происходит это изменение, в секундах;

W — число витков в контуре.

Ввиду того, что витки в контуре соединены последовательно, электродвижущие силы, индуцируемые в них, складываются и дают результирующую электродвижущую силу. Знак минус в формуле означает, что индуцированная электродвижущая сила в контуре по правилу Ленца всегда направлена так, что противодействует причине, ее вызывающей.

Этой формулой пользуются обычно в тех случаях, когда скорость изменения магнитного потока, сцепленного с контуром, переменная. В этих случаях индуцированная электродвижущая сила в контуре также получается переменной, поэтому ее в формуле (58) и обозначают маленькой буквой e , как это принято в теории для обозначения переменных величин.

При постоянной скорости изменения магнитного потока индуцированная электродвижущая сила по величине получается постоянной, и формула (58) принимает вид

$$E = W \frac{\Phi}{t} \text{ вольт,} \quad (59)$$

так как в этом случае скорость изменения магнитного потока определяется отношением

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Phi}{t}.$$

Приведенные формулы дают возможность определять величины индуктированных электродвижущих сил, получаемых любым способом.

Известны три способа получения индуктированных электродвижущих сил: способ **индукции**, **самоиндукции** и **взаимоиндукции**. В соответствии с этим различают электродвижущую силу индукции, самоиндукции и взаимоиндукции.

Все три способа получения электродвижущей силы принципиально один от другого ничем не отличаются. В каждом из них индуктированная электродвижущая сила получается в результате взаимного пересечения проводника и магнитных силовых линий.

§ 48. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ИНДУКЦИИ

Электродвижущую силу индукции получают путем перемещения проводника в неподвижном магнитном поле или же путем перемещения (изменения) магнитного поля относительно неподвижного проводника.

Этот способ получения электродвижущей силы применяется в генераторах постоянного и переменного токов.

В генераторах постоянного тока магнитное поле, создаваемое сильными электромагнитами, остается неподвижным и в нем перемещается проводник. В генераторах переменного тока, наоборот, проводник остается неподвижным, а относительно него перемещается магнитное поле электромагнитов.

Для примера определим величину электродвижущей силы индукции в проводнике AB (рис. 69, а) длиной l метров, движущемся с постоянной скоростью $v \left[\frac{\text{м}}{\text{сек}} \right]$ в равномерном магнитном поле с магнитной индукцией $B \left[\frac{\text{вб-сек}}{\text{м}^2} \right]$. На рисунке поле направлено от чертежа, а проводник движется перпендикулярно к магнитным силовым линиям.

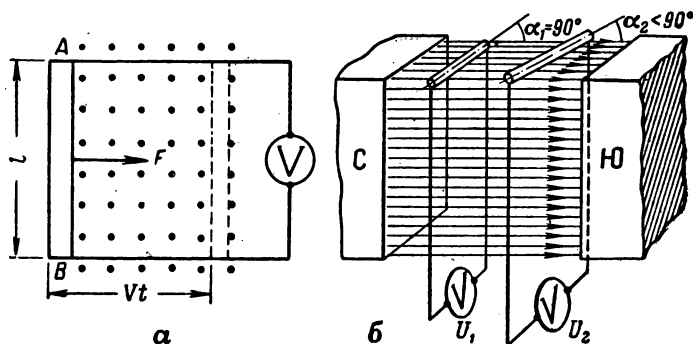


Рис. 69

Вследствие постоянной скорости движения проводника и равномерности магнитного поля магнитный поток, сцепленный с контуром проводника, уменьшается равномерно с постоянной скоростью $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$. Следовательно, это — частный случай изменения магнитного потока, сцепленного с контуром. Поэтому для определения величины электродвижущей силы индукции можем применить формулу

$$E = W \frac{\Phi}{t} \text{ вольт.}$$

В нашем примере $W = 1$ и вся задача, таким образом, сводится к определению величины магнитного потока, сцепленного с контуром проводника, при указанном на рис. 69, а положении. Для определения магнитного потока воспользуемся формулой

$$\Phi = BS,$$

где B — магнитная индукция поля в $\frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$;

S — площадь, которую опишет проводник при своем движении в магнитном поле, в квадратных метрах.

Как видно из рис. 69, а, эта площадь определяется по формуле

$$S = lvt,$$

где l — активная длина проводника, т. е. длина, участвующая в пересечении магнитных силовых линий, в метрах;

vt — путь, который проходит проводник в магнитном поле, в метрах за время t секунд.

Подставив значение площади в формулу $\Phi = BS$, получим

$$\Phi = Blvt \text{ вольт-секунд.}$$

Зная величину магнитного потока, сцепленного с контуром проводника, и подставив ее в формулу $E = \frac{\Phi}{t}$ (так как $w = 1$), найдем величину электродвижущей силы индукции в проводнике:

$$E = \frac{Blvt}{t},$$

или

$$E = Blv \text{ вольт.} \quad (60)$$

В том случае, когда проводник той же длины движется под углом $\alpha < 90^\circ$ к магнитным силовым линиям (рис. 69, б, правый контур), магнитный поток, сцепленный с контуром проводника, уменьшается. Для учета уменьшения магнитного потока в формулу (60) вводится $\sin \alpha$, и она принимает следующий вид:

$$E = Blv \sin \alpha \text{ вольт.} \quad (61)$$

Эта формула позволяет определять величину электродвижущей силы индукции в проводнике при любом его положении относительно магнитных силовых линий. Наибольшая величина электродвижущей силы в электрических генераторах получается лишь при условии, когда проводник составляет с магнитными силовыми линиями угол в 90° ($\sin 90^\circ = 1$).

§ 49. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА САМОИНДУКЦИИ

В момент появления тока в проводнике образуется и магнитное поле. Магнитные силовые линии как бы возникают на геометрической оси проводника и в дальнейшем при нарастании тока увеличиваются по длине. Одновременно с увеличением тока идет непрерывное образование новых магнитных силовых линий. С уменьшением тока в проводнике магнитные силовые линии уменьшаются по длине и, стягиваясь к геометрической оси проводника, исчезают.

При увеличении тока магнитные силовые линии пересекают проводник по всей его длине от центра к поверхности, а при уменьшении, наоборот, — от поверхности к центру.

В результате пересечений в проводнике по закону электромагнитной индукции наводится электродвижущая сила, которую называют **электродвижущей силой самоиндукции**.

В цепях постоянного тока электродвижущая сила самоиндукции обычно не используется, но возникает при изменениях тока, поэтому с ней в некоторых случаях приходится считаться.

При переменном токе электродвижущая сила самоиндукции вследствие непрерывного изменения тока индуктируется в проводнике все время.

Для определения величины электродвижущей силы самоиндукции пользуются известной нам формулой

$$e = - W \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \text{ вольт,}$$

поскольку магнитный поток, создаваемый током проводника, оказывается сцепленным с витками этого проводника. Эта формула не отражает главного условия, при котором возникает электродвижущая сила самоиндукции, а именно, изменения тока в проводнике, поэтому ее приводят к следующему виду:

$$e_L = - L \frac{\Delta I}{\Delta t} \text{ вольт,} \quad (62)$$

где $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ — скорость изменения тока в проводнике, аналогичная скорости изменения магнитного потока, сцепленного с контуром;

L — постоянная для каждого проводника величина, называемая коэффициентом самоиндукции или индуктивностью проводника.

Индекс L при букве e условились ставить только для обозначения электродвижущей силы самоиндукции.

Переход от формулы $e = -W \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ к формуле $e_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ можно сделать на основе следующих рассуждений.

Известно (§ 37), что напряженность магнитного поля, создаваемого током, пропорциональна только величине тока. Магнитный поток, сцепленный с контуром или витками проводника, благодаря этому также должен быть пропорционален току.

Для соленоида напряженность магнитного поля определяется формулой

$$H = \frac{IW}{l} \frac{\text{ампер}}{\text{метр}}.$$

При условии создания магнитного поля в воздухе (для воздуха $\mu_r = 1$) величина магнитной индукции внутри соленоида

$$B = \mu_r \mu_0 H = \frac{4\pi IW}{l} \cdot 10^{-7} \frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2},$$

отсюда магнитный поток, сцепленный с витками соленоида,

$$\Phi = BS = \frac{4\pi WS}{l} \cdot 10^{-7} I \text{ вольт-секунд},$$

где S — площадь поперечного сечения соленоида в квадратных метрах.

Из формулы видно, что магнитный поток соленоида действительно пропорционален току. Но если две величины пропорциональны, то пропорциональность между ними сохраняется и при сколь угодно малых значениях этих величин, поэтому можно написать

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi WS}{l} \cdot 10^{-7} \Delta I.$$

Подставив значение $\Delta\Phi$ в формулу $e = -W \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, получим

$$e = -\frac{4\pi W^2 S}{l} \cdot 10^{-7} \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

или

$$e_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

где

$$L = \frac{4\pi W^2 S}{l} \cdot 10^{-7} \quad (63)$$

и есть коэффициент самоиндукции соленоида.

В системе единиц МКСА коэффициент самоиндукции измеряется в генри (гн, Н). Генри — это такой коэффициент самоиндукции, или такая индуктивность, при которой в проводнике индуцируется электродвижущая сила самоиндукции в один вольт при изменении тока на один ампер в одну секунду. Данное определение генри следует из формулы $e_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, если в ней положить $e_L = 1$ в, $\Delta I = 1$ а и $\Delta t = 1$ сек. Более мелкой единицей измерения коэффициента самоиндукции является миллигенри (мгн или мН) — тысячная доля генри.

Из формулы (63) следует, что коэффициент самоиндукции для данного соленоида есть величина постоянная, зависящая от его геометрических размеров (l и S), а также от числа витков в квадрате. С физической точки зрения коэффициент самоиндукции характеризует собой степень участия самого проводника в создании электродвижущей силы самоиндукции (e_L зависит не только от $\frac{\Delta I}{\Delta t}$, но и от геометрических размеров самого проводника).

При наличии в соленоиде железного сердечника формулу для коэффициента самоиндукции следует написать так:

$$L = \frac{4\pi W^2 S \mu_r}{l} \cdot 10^{-7} H, \quad (63a)$$

где μ_r — относительная проницаемость железа (появление μ_r в формуле следует из равенства $B = \mu_r \mu_0 H$).

Величина относительной магнитной проницаемости железа, как было показано в § 39, зависит от напряженности магнитного поля, поэтому при изменении тока в соленоиде относительная магнитная проницаемость сердечника и коэффициент самоиндукции соленоида также изменяются.

Формула (63a) имеет, однако, теоретический интерес, поскольку на практике применяются не соленоиды, а катушки, которые отличаются от соленоидов как своими размерами, так и расположением витков. Для вычисления коэффициентов самоиндукции реальных катушек формулу (63a) приводят к виду

$$L = k \frac{4\pi W^2 S \mu_r}{l} \cdot 10^{-7} H, \quad (63б)$$

где k — некоторый постоянный коэффициент, который в каждом отдельном случае вычисляется по особым формулам.

Коэффициент k учитывает геометрические размеры катушки (отношение ее диаметра к длине), а также количество слоев, которыми располагаются витки в катушке (катушки обычно изготавливаются многослойными).

Таким образом, как показывает формула (63б), и у реальной катушки, имеющей железный сердечник, коэффициент

самоиндукции уже не остается постоянным, а зависит от величины тока в катушке.

При расчетах катушек коэффициент самоиндукции принимают равным некоторой средней величине, которую можно определить, зная пределы изменения тока в катушке и пользуясь кривой относительной магнитной проницаемости для железа данного сердечника (см. рис. 55, б) ¹.

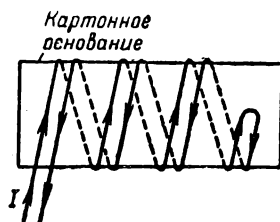


Рис. 70

Эта средняя величина во много раз превышает коэффициент самоиндукции той же катушки, взятой без железного сердечника, поэтому электродвижущая сила самоиндукции в катушке с железным сердечником получается очень большой.

В тех случаях, когда появление электродвижущей силы самоиндукции в катушках нежелательно, применяют бифилярную обмотку (рис. 70). При такой обмотке токи в каждом двух соседних витках направлены в противоположные стороны, что приводит к взаимной компенсации их магнитных потоков, а следовательно, к уничтожению электродвижущих сил самоиндукции.

Катушки с бифилярными обмотками не имеют железных сердечников — в них нет необходимости.

§ 50. ФИЗИЧЕСКИЙ СМЫСЛ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ САМОИНДУКЦИИ

С физической точки зрения электродвижущая сила самоиндукции представляет собой энергию, приходящуюся на единичный заряд, в которую частично превращается энергия источника при увеличении тока в цепи.

На рис. 71 показан продольный разрез проводника по его геометрической оси AB . Пусть ток I в проводнике увеличивается и направлен вправо. Истинное направление движения электронов должно быть противоположным, т. е. электроны будут двигаться влево. Точки и крестики на рисунке указывают направление магнитных силовых линий в сечении проводника. В верхней части проводника магнитные силовые линии будут перемещаться вверх при нарастании тока в цепи.

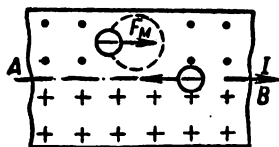


Рис. 71

Чтобы установить характер действия сил поля на отдельные электроны, будем считать, что поле неподвижно, а электрон перемещается относительно него вниз. Тогда сила магнитного

¹ По кривой определяют среднее арифметическое значение относительной магнитной проницаемости, которое затем подставляют в формулу (636).

поля F_m будет оказывать на электрон давление вправо, т. е. противоположное тому, которое электрон испытывает со стороны электрического поля источника, вызывающего ток в проводнике.

Таким образом, при увеличении тока в проводнике силы возникающего магнитного поля противодействуют движению свободных электронов. Такое действие сил магнитного поля на электроны будет продолжаться до тех пор, пока ток в цепи не перестанет увеличиваться, а магнитное поле не прекратит свое изменение (движение) относительно проводника. Для преодоления сил магнитного поля будет расходоваться энергия электрического поля источника.

Электродвижущая сила самоиндукции и представляет собой энергию, которая расходуется источником на перемещение каждого единичного заряда против направления сил магнитного поля.

По закону сохранения энергии возникающая в цепи электродвижущая сила самоиндукции при увеличении тока превращается в энергию магнитного поля. Величина энергии магнитного поля при неизменном токе в цепи может быть определена по формуле

$$W_m = \frac{I^2 L}{2} \text{ джоуль,} \quad (64)$$

где I — ток в амперах;

L — коэффициент самоиндукции цепи в генри.

При уменьшении тока в цепи магнитное поле начнет уменьшаться, а магнитные силовые линии изменят свое направление на обратное. В этом случае силы магнитного поля также изменят свое направление и будут поддерживать движение свободных электронов (величину тока в цепи), расходуя на это энергию магнитного поля (рис. 71).

Таким образом, при уменьшении тока электродвижущая сила самоиндукции возникает за счет энергии, накопленной магнитным полем, и расходуется на преодоление сопротивления цепи каждым единичным зарядом.

Нельзя не заметить, что действие сил собственного магнитного поля тока на свободные электроны в проводнике аналогично действию силы инерции тела. Эта сила, как известно, проявляется лишь при изменении скорости движения тела и всегда направлена против действия внешней силы, сообщаемой телу ускорение того или иного знака.

У электронов, обладающих массой, сила инерции проявляется в действии сил магнитного поля, образуемого движением самих же электронов. Электродвижущая сила самоиндукции находится в прямой зависимости от возникающих сил магнитного поля и характеризует величину этих сил и их направление. Поэтому очень часто для простоты рассуждений

действие электродвижущей силы самоиндукции сравнивают с действием силы инерции тела.

Итак, при увеличении тока в цепи магнитное поле пополняет свои энергетические запасы за счет той энергии, которую расходует источник на преодоление зарядами сил магнитного поля. При уменьшении тока, наоборот, магнитное поле расходует запасенную энергию в виде электродвижущей силы самоиндукции, сообщаемой каждому единичному заряду. Наконец, при неизменном токе в цепи энергия магнитного поля также остается неизменной и электродвижущая сила самоиндукции не возникает.

§ 51. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ И ВЫКЛЮЧЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ, ОБЛАДАЮЩИХ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Электродвижущая сила самоиндукции в цепях постоянного тока проявляется слишком кратковременно, лишь в моменты изменения тока, поэтому ее чаще всего не учитывают.

Закон Ома в той форме, в которой мы его рассматривали ($I = \frac{E}{R_1 + R_0}$), справедлив лишь для установившихся режимов, т. е. для таких режимов, при которых ток в цепи не изменяет своей величины, а электродвижущая сила самоиндукции отсутствует (так как $\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0$). Всякое изменение тока, нарушающее установившийся режим, приводит к появлению в цепи электродвижущей силы самоиндукции.

Из неустановившихся режимов большой практический интерес представляют два режима, из которых один возникает при замыкании, а другой при размыкании электрических цепей, обладающих индуктивностью.

Пусть катушка (рис. 72) с индуктивностью L генри и сопротивлением R ом включается под напряжение источника с электродвижущей силой E вольт и внутренним сопротивлением R_0 ом. Через некоторое время после включения рубиль-

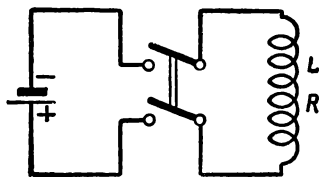


Рис. 72

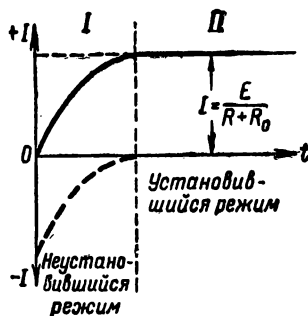


Рис. 73

ника в цепи наступит установившийся режим, для которого величина тока может быть определена по формуле

$$I = \frac{E}{R + R_0}.$$

Нарастание тока в течение неустановившегося режима будет происходить так, как это показано на графике (рис. 73). В момент включения рубильника ток в цепи отсутствует, поэтому график начинается от нуля (участок *I*). Электроны в силу своей инерции набирают скорость постепенно. Следовательно, потребуется некоторое время для того, чтобы их скорость достигла величины, соответствующей току установившегося режима (участок *II*). Время, в течение которого электроны набирают скорость (доли секунды), представляет собой продолжительность неустановившегося режима.

Причиной возникновения электродвижущей силы самоиндукции является нарастание тока в цепи после включения рубильника. Чтобы противодействовать этому нарастанию, электродвижущая сила самоиндукции должна быть направлена против тока (правило Ленца), а следовательно, и против электродвижущей силы источника *E*.

Применяя к нашей цепи второе правило Кирхгофа, можем написать

$$E - e_L = iR + iR_0,$$

отсюда

$$i = \frac{E - e_L}{R + R_0}, \quad (65)$$

где *i* — мгновенное значение тока при неустановившемся режиме.

Это и есть формула закона Ома для неустановившегося режима при включении электрических цепей. Формула справедлива и для переходных неустановившихся режимов, которые возникают в цепи при уменьшении сопротивления *R* внешнего участка.

Математически формулу (65) можно написать и так:

$$i = \frac{E}{R + R_0} - \frac{e_L}{R + R_0}.$$

В этом виде формула означает, что при неустановившемся режиме ток в цепи состоит как бы из двух составляющих: из постоянной составляющей $I = \frac{E}{R + R_0}$, равной по величине току установившегося режима, и переменной составляющей $i_n = -\frac{e_L}{R + R_0}$, которая направлена против постоянной состав-

ляющей и существует только при неустановившемся режиме, т. е. пока в цепи действует электродвижущая сила самоиндукции. Алгебраическая сумма этих двух составляющих в любой момент времени и дает величину истинного тока в цепи при неустановившемся режиме. Графики переменной и постоянной составляющих тока на рис. 73 (участок I) изображены пунктиром.

Переменная составляющая неустановившегося режима называется экстратоком замыкания. Промежуток времени (от точки O), в течение которого экстраток замыкания уменьшается на 63% против своей начальной величины, называется постоянной времени τ катушки или цепи, в которой наблюдается неустановившийся режим. Постоянная времени определяется по формуле

$$\tau = \frac{L}{R} \text{ сек.}, \quad (66)$$

где L — коэффициент самоиндукции катушки в генри;

R — ее сопротивление в омах.

При неустановившемся режиме по цепи в действительности проходит один ток. Этот ток, как видно из рис. 73, увеличивается по времени соответственно уменьшению переменной составляющей (т. е. экстратока замыкания). Поэтому можно сказать, что после включения рубильника за время, равное τ , истинный ток в цепи достигает 63% своей конечной величины, т. е. величины тока установившегося режима:

$$I = \frac{E}{R + R_0}.$$

Величину постоянной времени необходимо знать при рассмотрении неустановившихся режимов в отдельных цепях радиотехнических устройств. По ней можно судить о продолжительности неустановившегося режима и о величине тока в цепи. Практически продолжительность неустановившегося режима длится 5τ .

Выясним физический смысл формулы $\tau = \frac{L}{R}$. С увеличением коэффициента самоиндукции L увеличивается и электродвижущая сила самоиндукции $e_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$, которая еще больше задерживает нарастание тока в цепи, поэтому постоянная времени согласно формуле (66) увеличивается. С уменьшением L электродвижущая сила самоиндукции уменьшается и оказывает меньшее противодействие нарастанию тока, что приводит к уменьшению τ .

При возрастании сопротивления R цепи величина тока установившегося режима $\left(I = \frac{E}{R + R_0} \right)$ уменьшается, что соот-

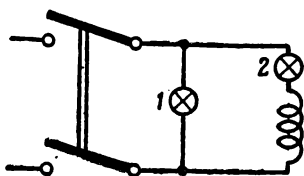


Рис. 74

ветствует меньшей конечной скорости движения электронов, а чтобы эту скорость электроны набрали, требуется и меньшее время. Следовательно, τ уменьшается с увеличением R . При уменьшении R происходит обратное, т. е. τ увеличивается.

Действие электродвижущей силы самоиндукции при включении электрических цепей можно продемонстрировать цепью, схема которой изображена на рис. 74. В этой цепи две одинаковые лампы включены параллельно, причем последовательно одной из них включена катушка, обладающая большим коэффициентом самоиндукции. В момент включения рубильника лампа 1 загорается сразу, а лампа 2 — несколько позже и это, конечно, объясняется появлением электродвижущей силы самоиндукции в цепи лампы.

Перейдем к режиму, возникающему при размыкании электрических цепей, и рассмотрим его на примере той же цепи (рис. 72).

При выключении цепи электродвижущая сила самоиндукции по правилу Ленца имеет одинаковое направление с током в цепи, чтобы поддерживать его величину неизменной. В соответствии с этим закон Ома для тока размыкания при установленном режиме мы должны написать так:

$$i = \frac{E + e_L}{R + R_0 + R_b},$$

где R_b — сопротивление, вводимое в цепь при ее разрыве (возникающее за счет увеличения контактного сопротивления в рубильнике и за счет воздушного промежутка).

График тока при размыкании цепи, изображенный на рис. 75, представляет собой как бы повернутый на 180° вокруг оси времени график экстратока замыкания (относится к случаю, когда при размыкании контактов в цепи не возникает электрической дуги). Ток, возникающий в цепи при ее размыкании, называется экстратокком размыкания.

При размыкании цепи по мере выхода ножей из пружинящих контактов рубильника контактное сопротивление между ними возрастает (за счет уменьшения площади соприкосновения) и, наконец, становится очень большим, когда в цепь вводится воздушный промежуток. Вследствие резкого возрастания контактного сопротивления ток в цепи к мо-

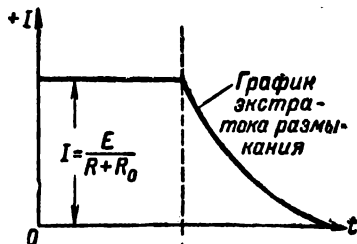


Рис. 75

менту ее разрыва начинает быстро падать, несмотря на то, что электродвижущая сила самоиндукции имеет одинаковое с током направление.

После разрыва цепи электроны продолжают двигаться как бы по инерции (под действием электродвижущей силы самоиндукции), при этом они проскакивают через воздушный промежуток и вызывают искру (свечение сильно нагретых частиц воздуха). Таким образом, экстраток размыкания внешне проявляется в виде искры, представляющей собой электрическую дугу, но в несравненно меньшем масштабе (настоящая дуга не возникает из-за быстрого отвода ножей рубильника от пружинящих контактов).

За время τ экстраток уменьшается на 63% своей начальной величины, поэтому в момент окончательного разрыва цепи ток в ней может иметь еще достаточную величину (если разрыв цепи происходит очень быстро), что приводит к обгоранию ножей и контактов рубильника.

При резком уменьшении тока в цепи с помощью реостата график тока неустановившегося режима принимает такой же вид, как и график экстраток размыкания.

При разрыве цепей постоянного тока, содержащих намагничивающие катушки с железным сердечником, электродвижущая сила самоиндукции достигает больших значений и бывает в три — четыре раза больше электродвижущей силы источника, питавшего цепь до ее разрыва. Возникающее при этом сильное электрическое поле может привести к пробое изоляции катушек.

§ 52. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ВЗАИМОИНДУКЦИИ

Если в непосредственной близости одна от другой расположить две катушки (рис. 76) так, чтобы магнитные силовые линии одной из них сцеплялись с витками другой, то при всяком изменении тока в одной катушке, например первой (I), во второй (II) катушке будет наводиться электродвижущая сила. Эту электродвижущую силу называют электродвижущей силой взаимной индукции. Конечно, в первой катушке одновременно наводится электродвижущая сила самоиндукции.

Из рис. 76 видно, что часть магнитного потока, создаваемого током первой катушки, оказывается сцепленной с витками второй катушки. При изменении тока в первой катушке магнитный поток, сцепленный с витками второй катушки, также изменяется, поэтому в этой катушке и возникает электродвижущая сила. Физически

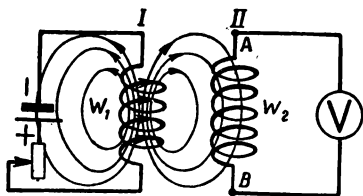


Рис. 76

электродвижущая сила взаимной индукции представляет собой энергию, приходящуюся на единичный заряд, в которую частично превращается энергия магнитного поля первой катушки.

Сам процесс такого превращения энергии заключается в следующем.

Нам уже известно (§ 50), что при увеличении тока в первой катушке ее магнитное поле начинает перемещаться в пространстве. Перемещаясь относительно второй катушки, это поле электризует ее зажимы A и B , т. е. смещает свободные электроны к одному из зажимов, и расходует энергию для преодоления сил электрического поля, возникающего в катушке.

Энергия, расходуемая полем первой катушки на смещение каждого единичного заряда во второй катушке, переходит в энергию электрического поля этой катушки и образует ее электродвижущую силу взаимной индукции. Так как магнитное поле первой катушки получает энергию от источника тока, то можно сказать, что в конечном итоге электродвижущая сила взаимной индукции во второй катушке возникает за счет энергии источника, питающего первую катушку.

Если вторую катушку включить на приемник, то электродвижущая сила взаимной индукции вызовет в нем ток. Расходуемая в приемнике энергия поступит из магнитного поля первой катушки, а источник, питающий катушку, сейчас же пополнит израсходованную полем энергию. Так, на основе магнитной связи между катушками осуществляется переход энергии источника из одной катушки в другую всякий раз, когда изменится ток в катушке, питаемой источником тока.

Явление взаимной индукции широко применяется на практике в индукционных катушках (§ 54) и в трансформаторах для преобразования переменного напряжения из низкого в высокое и наоборот.

Величина электродвижущей силы взаимной индукции определяется формулой, которая мало отличается от формулы для определения электродвижущей силы самоиндукции. Так, для определения электродвижущей силы взаимной индукции, наводимой во второй катушке, формула имеет вид

$$e_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t}, \quad (67)$$

где $\frac{\Delta I_1}{\Delta t}$ — скорость изменения тока в первой катушке;

M — коэффициент взаимной индукции катушек в генри.

Для случая, когда обе катушки имеют общий замкнутый железный сердечник, можно считать, что магнитный поток, создаваемый током первой катушки, полностью сцеплен с витками обеих катушек и поток магнитного рассеяния практиче-

ски равен нулю. При этом условии нетрудно доказать (см. вывод формулы для L , § 49), что коэффициент взаимоиנדукции катушек определяется формулой

$$M = \frac{4\pi W_1 W_2 S \mu_r}{l} \cdot 10^{-7} \text{ генри,}$$

где W_1 и W_2 — количество витков катушек;

S — поперечное сечение сердечника в квадратных метрах;

l — длина средней магнитной силовой линии в сердечнике в метрах;

μ_r — относительная проницаемость сердечника.

Коэффициент взаимоиנדукции характеризует собой степень участия обеих катушек в создании электродвижущей силы взаимоиנדукции.

Установим зависимость между коэффициентом взаимоиנדукции и коэффициентами самоиנדукции катушек.

Для коэффициентов самоиנדукции катушек, изображенных на рис. 77, можно написать

$$L_1 = \frac{4\pi W_1^2 S \mu_r}{l} \cdot 10^{-7}; \quad L_2 = \frac{4\pi W_2^2 S \mu_r}{l} \cdot 10^{-7}.$$

Перемножив значения коэффициентов, получим

$$L_1 L_2 = \frac{4^2 \pi^2 W_1^2 W_2^2 S^2 \mu_r^2}{l^2} \cdot (10^{-7})^2$$

или, после извлечения корня квадратного из обеих частей,

$$\sqrt{L_1 L_2} = \frac{4\pi W_1 W_2 S \mu_r}{l} \cdot 10^{-7}.$$

Но

$$\frac{4\pi W_1 W_2 S \mu_r}{l} \cdot 10^{-7} = M,$$

следовательно,

$$M = \sqrt{L_1 L_2}.$$

При наличии магнитного рассеяния (рис. 76) формула принимает вид

$$M = K \sqrt{L_1 L_2}, \quad (68)$$

где K — коэффициент магнитной связи между катушками.

Этот коэффициент зависит от взаимного расположения катушек и может изменяться от нуля, когда магнитная связь

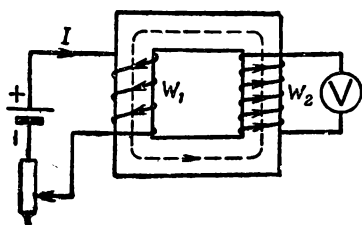


Рис. 77

между катушками отсутствует, до единицы для случая, изображенного на рис. 77.

Итак, рассмотрев все три способа получения индуцированных электродвижущих сил, мы можем прийти к заключению, что эти способы в принципе ничем не отличаются один от другого, так как в

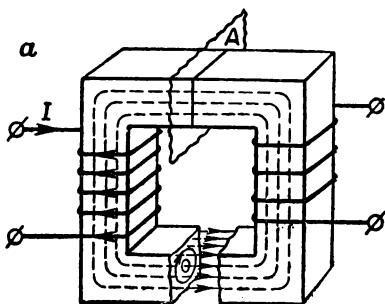
каждом из них индуцированная электродвижущая сила получается вследствие изменения магнитного потока, сцепленного с контуром.

§ 53. ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

Вихревыми токами называются токи, индуцируемые в сплошных массивных проводниках при пересечении их магнитными силовыми линиями. Такое название эти токи получили вследствие того, что они замыкаются в проводниках по кривым линиям наподобие вихрей, образуемых частицами воздуха. Иногда вихревые токи называют паразитными, так как они большей частью приводят лишь к непроизводительному расходу энергии и вызывают нагрев проводников.

В электрических машинах, индукционных катушках и трансформаторах паразитные токи возникают в железных сердечниках, применяемых для усиления магнитных полей, создаваемых током.

Сердечник трансформатора (рис. 78, а) можно представить состоящим из большого числа цилиндрических слоев, образующие которых параллельны силовым линиям магнитного потока. На рис. 78, б показано поперечное сечение сердечника трансформатора. Из этого рисунка видно, что цилиндрические слои при пересечении их параллельными плоскостями образуют концентрические кольца. Каждое такое кольцо представляет собой замкнутый контур, сцепленный с той или иной частью магнит-



б

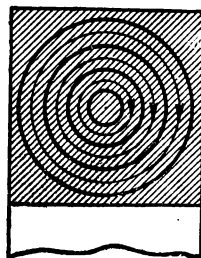


Рис. 78

ного потока, создаваемого током I катушки. При изменении магнитного потока в каждом кольце наводится электродвижущая сила взаимной индукции, а следовательно, и ток, замыкающийся по кольцу. Совокупность всех этих токов в сердечнике и образует вихревые токи (рис. 78, б).

Вихревые токи согласно правилу Ленца препятствуют всякому изменению магнитного потока сердечника, т. е. всегда имеют такое направление, при котором создаваемое ими магнитное поле при увеличении потока в сердечнике направлено против этого потока, а при уменьшении потока согласно с ним. Кроме того, они вызывают нагрев сердечника, непроизводительно расходуя энергию источника, питающего обмотку трансформатора.

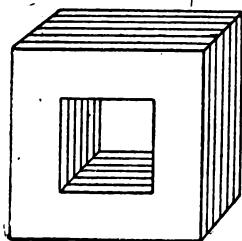


Рис. 79

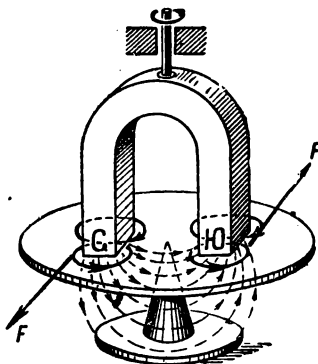


Рис. 80

Вследствие малого сопротивления сплошных сердечников паразитные токи достигают в них больших значений и сильно нагревают эти сердечники. Совершенно устранить паразитные токи нельзя, можно лишь уменьшить их до значений, при которых нагрев сердечников становится незначительным.

Из выражения $I = \frac{E}{R}$ следует, что для уменьшения паразитных токов нужно уменьшать возникающую электродвижущую силу и увеличивать сопротивление сердечника.

Уменьшение электродвижущей силы достигается тем, что сердечники делаются не сплошными, а наборными, из тонких листов электротехнической стали, разделенных слоем изоляции (специальный лак, тонкая бумага или просто слой окислы, получающийся при прокате листов).

Слои листов в сердечниках располагают параллельно магнитным силовым линиям потока (рис. 79). При таком расположении листов они не препятствуют прохождению магнитного потока, но зато значительно уменьшают активную длину l , т. е. длину, которая участвует в создании электродвижущей силы ($E = lBv$) в сплошном сердечнике. Для каждого слоя сердечника активная длина Δl получается незначи-

тельной, равной толщине листа (0,2—0,3 мм), поэтому и электродвижущая сила в каждом слое получается также незначительной.

Возникающие паразитные токи при таком устройстве сердечников замыкаются лишь в каждом слое, а не по всему сердечнику. Вследствие небольшой величины электродвижущей силы в каждом слое, а также благодаря увеличению сопротивления каждого слоя (поперечное сечение слоя значительно меньше поперечного сечения сплошного сердечника) паразитные токи в отдельных слоях получаются также незначительными.

Чтобы добиться еще более значительного уменьшения паразитных токов, в железо сердечников добавляют до 4% кремния, который заметно повышает удельное сопротивление железа, не ухудшая его магнитных свойств.

Вихревые токи находят на практике и полезное применение. В некоторых случаях их используют для создания электромагнитного вращения или торможения, а также для экранировки (защиты) катушек от нежелательных магнитных связей. Для получения электромагнитного вращения с помощью вихревых токов над уравновешенным на оси диском из немагнитного металла (например, алюминия, меди и т. п.) вращают постоянный магнит (рис. 80). При этом диск тоже будет вращаться в том же направлении, что и магнит. Вращение диска объясняется взаимодействием магнитного поля постоянного магнита с вихревыми токами I_v , которые индуктируются в диске при его пересечении силовыми линиями постоянного магнита. Однако диск будет вращаться несколько медленнее магнита, иначе он не станет пересекаться магнитными силовыми линиями и в нем не наведутся вихревые токи, а следовательно, не возникнет сила F , вращающая диск.

Электромагнитное торможение с помощью вихревых токов осуществляется следующим образом. Диск (рис. 80) приводят во вращение с помощью внешней силы, а затем над ним помещают постоянный неподвижный магнит. В результате пересечения диска магнитными силовыми линиями в нем возникают вихревые токи. Взаимодействие этих токов с полем магнита приводит к возникновению силы F , которая и останавливает диск.

Действие вихревых токов как при вращении диска, так и при торможении его легко объясняется правилом Ленца: и в том, и в другом случае действие токов направлено против причины, их вызывающей.

Вихревые токи используются также для экранировки катушек. В радиотехнических устройствах часто бывают нежелательными магнитные связи между близко расположенными катушками. Эти связи приводят к искажениям в работе отдельных приборов.

Для устранения нежелательных магнитных связей катушку заключают в экран (рис. 81, а), выполненный в виде полого цилиндра из хорошо проводящего ток металла (меди или алюминия). При изменении тока в другой (внешней), рядом расположенной катушке ее магнитное поле наводит в экране вихревые токи. По правилу Ленца эти токи создают магнитное поле, направленное против магнитного поля внешней катушки.

Так, если во внешней катушке ток I увеличивается, то его поле наводит в экране токи, направление которых показано на рис. 81, а и б. Из рисунка видно, что поле, создаваемое вихревыми токами, в левой части стенки экрана противоположно по направлению полю внешней катушки. В результате последнее как бы уничтожается и не достигает катушки, заключенной в экран.

Экранирующее действие вихревых токов тем сильнее, чем больше их величина, поэтому экраны изготавливаются из металлов, хорошо проводящих ток.

В магнитодиэлектриках (§ 41), состоящих из мельчайших частиц ферромагнитных материалов, паразитные токи имеют незначительную величину. Объясняется это тем, что в магнитодиэлектриках отдельные частицы изолируются одна от другой связующим веществом, вследствие чего паразитные токи замыкаются только в пределах каждой частицы.

Малые потери энергии в магнитодиэлектриках от паразитных токов являются одним из существенных преимуществ этих материалов перед обычными магнитомягкими материалами.

§ 54. ИНДУКЦИОННАЯ КАТУШКА

Индукционной катушкой (бобиной) называется электромагнитный прибор, преобразующий низкое напряжение в высокое для получения искры в свечах автомобильного двигателя.

Катушка (рис. 82, а) состоит из наборного железного сердечника и двух обмоток из медной изолированной проволоки.

Одна из обмоток, называемая первичной, изготавливается из проволоки диаметром до 1 мм и имеет 200—250 витков (W_1). У другой обмотки, вторичной, диаметр проволоки составляет всего 0,08 мм, количество же витков W_2 колеблется от 15 до 16 тыс.

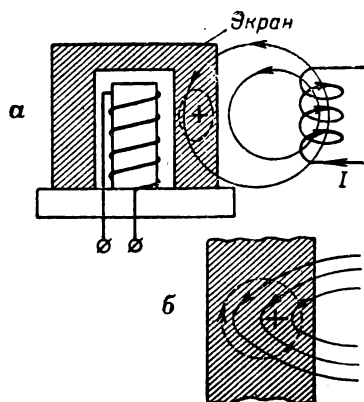


Рис. 81

Для усиления магнитной связи обмотки накладываются на сердечник одна на другую, причем первичная обмотка располагается поверх вторичной для лучшего ее охлаждения (при работе катушки ток в первичной обмотке получается больше, чем во вторичной).

Сердечник вместе с обмотками заключен в кожух из листового железа (рис. 82, б). В верхней части кожуха имеет высоковольтный изолятор *A* (карболитовый) с выводом одного из концов вторичной обмотки (конец *B* обмотки на рис. 82, а) и два зажима *a* и *b*, соединенных с выводами первичной обмотки. Другой конец вторичной обмотки припаян к первичной обмотке в точке *D* (рис. 82, а) и наружу не выводится. На автомобиле катушка закрепляется с помощью проушин *c* и *d* железного пояса, приваренного к средней части кожуха.

Для преобразования напряжения катушка включается в электрическую цепь, схема которой изображена на рис. 82, а. В этой схеме *B* — аккумуляторная батарея из трех последовательно соединенных аккумуляторов, *П* — прерыватель тока в цепи первичной обмотки, *C* — конденсатор, *Cв* — запальная свеча.

Металлический корпус автомобиля используется в качестве токоведущего провода и на электрических схемах обозначается косыми параллельными черточками.

Прерыватель *П* вращается (через шестерни) от автомобильного двигателя и в нужный момент разрывает цепь первичной обмотки с помощью двух пружинящих контактов *K*. На схеме прерыватель условно показан в виде диска с двумя вкладышами из изоляционного материала. В положении, указанном на рис. 82, а, прерыватель замыкает цепь первичной обмотки.

Запальная свеча состоит из центрального (в виде стержня) и бокового электродов, разделенных слоем изоляции (фарфоровая трубка) и отстоящих один от другого на расстоянии до

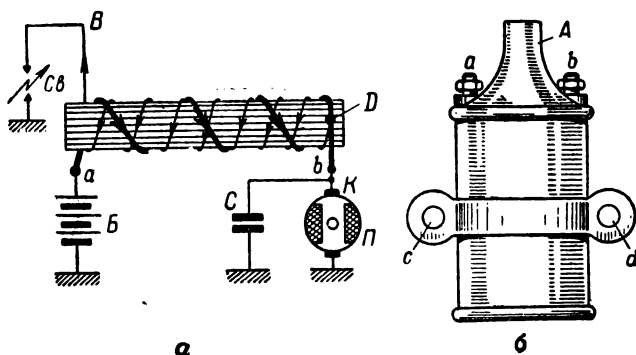


Рис. 82

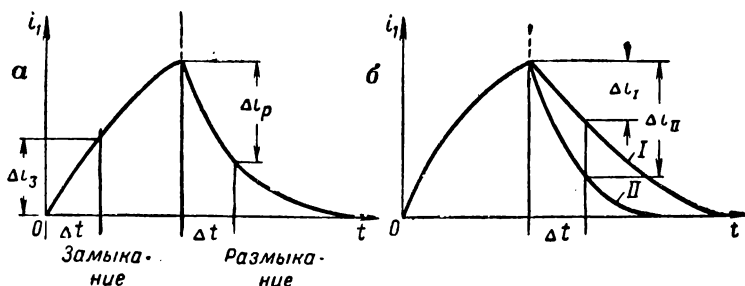


Рис. 83

0,8 мм. При размыкании цепи первичной обмотки между электродами проскакивает сильная искра, которая зажигает рабочую смесь (смесь бензина и воздуха), сжатую в цилиндре двигателя до давления в пять атмосфер. Свободный конец вторичной обмотки (т. е. вывод через изолятор А) высоковольтным гибким проводом соединен с центральным электродом свечи.

Как видно из схемы, отрицательный зажим батареи, боковой электрод свечи, нижний контакт прерывателя и нижняя обкладка конденсатора соединены с корпусом автомобиля. Вследствие малого сопротивления корпуса можно считать, что все перечисленные элементы схемы присоединены к одной общей точке.

Действие катушки основано на возникновении электродвижущей силы взаимной индукции во вторичной обмотке. Рассмотрим работу катушки и выведем зависимость между электродвижущими силами в ее обмотках.

При вращении прерыватель поочередно замыкает и размыкает цепь первичной обмотки. В результате от батареи в обмотку проходит пульсирующий ток, график которого изображен на рис. 83, а. Этот график соответствует изменениям токов, возникающих при замыкании и размыкании цепи (§ 51).

Проходя по первичной обмотке, ток i_1 создает в сердечнике изменяющийся магнитный поток Φ_1 , сцепленный с витками обеих обмоток. От изменения магнитного потока в первичной обмотке возникает электродвижущая сила самоиндукции $e_1 = W_1 \frac{\Delta \Phi_1}{\Delta t}$, а во вторичной обмотке — электродвижущая

сила взаимной индукции $e_2 = W_2 \frac{\Delta \Phi_1}{\Delta t}$.

Разделив первое равенство на второе, получим

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (69)$$

Это и есть зависимость между электродвижущими силами, возникающими в обмотках катушки. Зависимость показы-

вает, что электродвижущая сила в каждой обмотке пропорциональна числу ее витков, а так как $W_2 \gg W_1$, то и электродвижущая сила взаимной индукции e_2 во вторичной обмотке получается значительно больше электродвижущей силы самоиндукции e_1 в первичной обмотке.

В момент разрыва цепи первичной обмотки электродвижущая сила во вторичной обмотке достигает величины порядка 18 000 в. Такая величина электродвижущей силы достаточна для того, чтобы вызвать сильную искру между электродами свечи, несмотря на повышенное давление рабочей смеси в цилиндре.

При замыкании цепи первичной обмотки прерывателем во вторичной обмотке также возникает электродвижущая сила взаимной индукции, но значительно меньшая по величине. Объясняется это тем, что при замыкании первичной обмотки в ней появляется электродвижущая сила самоиндукции, которая препятствует нарастанию тока (по правилу Ленца) и, следовательно, уменьшает скорость изменения (в данном случае увеличения) магнитного потока, сцепленного с витками вторичной обмотки (отчего уменьшается e_2).

Увеличить крутизну графика тока при замыкании первичной обмотки невозможно, так как крутизна зависит от постоянной времени $\tau = \frac{L}{R}$, где L — коэффициент самоиндукции первичной обмотки и R — сопротивление обмотки — постоянные величины.

Из графика тока первичной обмотки (рис. 83, а) видно, что скорость изменения этого тока, т. е. $\frac{\Delta i_1}{\Delta t}$, при размыкании обмотки больше, чем при ее замыкании ($\frac{\Delta i_p}{\Delta t} > \frac{\Delta i_s}{\Delta t}$), поэтому и скорость изменения магнитного потока ($\frac{\Delta \Phi_1}{\Delta t}$) в первом случае получается большей, чем во втором. Скорость же изменения магнитного потока определяет собой величину электродвижущей силы взаимной индукции e_2 во вторичной обмотке.

Для еще большего увеличения электродвижущей силы взаимной индукции во вторичной обмотке (за счет повышения скорости изменения тока в первичной обмотке), а также для уменьшения искры в прерывателе параллельно с прерывателем включают конденсатор. При наличии конденсатора в цепи первичной обмотки происходит следующее.

По мере того как прерыватель размыкает цепь, сопротивление в нем возрастает (из-за ухудшения контактов), а падение напряжения увеличивается, несмотря на некоторое уменьшение тока в цепи.

Увеличение падения напряжения на прерывателе можно объяснить так. Напряжение $U_{ак}$ на зажимах батареи, питаю-

шей обмотку, состоит из двух частей: из падения напряжения в обмотке (IR_1) и падения напряжения в прерывателе (IR_n), т. е.

$$U_{ак} = IR_1 + IR_n,$$

где I — величина тока в цепи;

R_1 и R_n — сопротивления обмотки и прерывателя.

Так как напряжение на зажимах батареи при ее работе практически остается постоянным, то с увеличением сопротивления прерывателя ток в цепи уменьшается. Это приводит к уменьшению падения напряжения в обмотке и к соответствующему увеличению падения напряжения в прерывателе, как это следует из равенства $U_{ак} = IR_1 + IR_n$.

В момент полного разрыва цепи первичной обмотки сопротивление прерывателя, а следовательно, и падение напряжения на нем резко возрастают, поэтому большая часть тока обмотки вместо прерывателя идет в конденсатор и быстро его заряжает. Таким образом, вследствие наличия конденсатора ток через прерыватель к моменту полного разрыва цепи уменьшается и это ослабляет искру между контактами; кроме того, в результате **быстрого** заряда конденсатора ток в цепи обмотки также **быстро** падает до нуля, отчего скорость его изменения $\frac{\Delta i_1}{\Delta t}$ значительно увеличивается.

Подбором емкости конденсатора обеспечивают нужную крутизну зарядного тока (рис. 83, б, кривая II) и этим добиваются повышения электродвижущей силы взаимной индукции во вторичной обмотке.

При отсутствии конденсатора график экстраток размыкания получается более пологим (рис. 83, б, кривая I), поэтому и электродвижущая сила взаимной индукции становится намного меньше (фактически не вызывает искры в свече цилиндра).

Небольшое повышение электродвижущей силы взаимной индукции во вторичной обмотке достигается еще и тем, что эта обмотка в точке D (рис. 82, а) соединяется последовательно с первичной обмоткой. Проследив по схеме путь тока во вторичной обмотке, увидим, что он замыкается по следующему контуру: точка D , вторичная обмотка, искровой промежуток свечи, корпус автомобиля, аккумуляторная батарея, первичная обмотка, точка D . В этом контуре электродвижущая сила самоиндукции первичной обмотки и электродвижущая сила взаимной индукции вторичной обмотки при разрыве цепи первичной обмотки действуют в одном направлении, что приводит к некоторому увеличению электродвижущей силы взаимной индукции (с ней складывается электродвижущая сила самоиндукции).

В случае пробоя изоляции в конденсаторе его обкладки

приходят в соприкосновение и через корпус замыкают цепь первичной обмотки. В результате этого действие прерывателя прекращается (ток в первичной обмотке обходит прерыватель через конденсатор), электродвижущая сила взаимной индукции во вторичной обмотке становится равной нулю и катушка перестает вызывать искру между электродами свечи. Пробытый конденсатор можно заменить другим, но такой же емкости.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ IV

А. Электромагнетизм

1. Что называется магнитным полем тока?
2. Каковы свойства магнитного поля?
3. Что такое магнитные силовые линии?
4. Каковы форма и особенность магнитного поля прямого тока?
5. Каковы форма и особенности полей кругового тока и соленоида?
6. Как определяются полюсы соленоида?
7. Какое магнитное поле называется неподвижным и какое движущимся?
8. Какова природа магнитного поля постоянного магнита?
9. Каков характер действия сил магнитного поля на электроны?
10. В чем заключается правило левой руки?
11. В чем состоит правило правой руки?
12. Что называется напряженностью магнитного поля и каковы единицы ее измерения?
13. От чего зависит напряженность магнитного поля внутри соленоида?
14. Что такое магнитная индукция и в каких единицах она измеряется?
15. Какова зависимость между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля?
16. Что характеризует собой магнитная проницаемость среды?
17. Каковы свойства ферромагнитных тел?
18. Что представляют собой кривые намагничивания и каково их практическое значение?
19. В чем заключается явление гистерезиса?
20. В чем различие магнитных свойств железа и стали?
21. Каковы свойства магнитотвердых и магнитомягких материалов?
22. Что такое магнитодиэлектрики и каковы их свойства?
23. Что называется магнитной цепью и магнитным потоком?
24. Каковы единицы измерения магнитного потока?
25. Какова зависимость между магнитным потоком, магнитной индукцией и площадью поперечного сечения магнитной цепи?
26. Что называется электромагнитом и какие бывают электромагниты?
27. Каково практическое применение электромагнитов?
28. От чего зависит величина и направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле?

Б. Электромагнитная индукция

1. В чем заключаются явления электромагнитной индукции и закон электромагнитной индукции?
2. Как формулируется правило Ленца и каково его практическое значение?
3. От чего зависит величина индуцированной электродвижущей силы (написать формулы для общего и частного случаев)?

4. Каковы способы получения индуцированных электродвижущих сил?
 5. В чем заключается способ индукции и где он используется на практике?
 6. В чем заключается способ самоиндукции и какова формула для определения величины электродвижущей силы самоиндукции?
 7. Каков физический смысл электродвижущей силы самоиндукции и каково ее направление по отношению к току в цепях?
 8. В чем заключается способ взаимной индукции и где он используется на практике?
 9. Что представляют собой вихревые токи?
 10. В чем заключается вредное и полезное действия вихревых токов?
 11. Каковы меры борьбы с вредным действием вихревых токов?
 12. В чем состоит принцип работы индукционной катушки и какова роль в ней конденсатора?
-

ГЛАВА V

ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

§ 55. ПРИМЕНЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКЕ

Постоянный ток в настоящее время применяется значительно реже, чем переменный. Его применение обусловливается либо самим ходом некоторых физических процессов, либо экономическими соображениями. Так, например, в электрометаллургии применение постоянного тока для очистки и добычи металлов диктуется тем, что в этих процессах используется электролиз, возможный только при постоянном токе. То же самое можно сказать и о применении постоянного тока для заряда аккумуляторов. Использование постоянного тока в электротяге, т. е. для питания электрических двигателей трамваев, троллейбусов, электровозов и подводных лодок, объясняется исключительно экономическими соображениями, так как в данном случае электрическая энергия при постоянном токе расходуется более рационально.

В остальных случаях современная техника использует главным образом переменный ток. В промышленности и сельском хозяйстве (электропахота, электрифицированные молотилки, веялки, мельницы и т. п.) в качестве привода используются главным образом двигатели переменного тока. Электрические лампы и бытовые нагревательные приборы (плитки, чайники и др.) питаются исключительно переменным током. Переменный ток весьма широко используется в радиотехнике, радиолокации, проводной связи и т. п. Наша военная техника также все шире и шире использует переменный ток для питания различных электрифицированных приборов и устройств.

Массовым применением электрической энергии переменного тока в народном хозяйстве объясняется то, что все крупные электростанции, такие как Волховская, Днепровская, Шатурская, Каширская и многие другие, вырабатывают переменный ток. Гигантские гидроэлектростанции, которые в

настоящее время строятся на Волге, Каме, Днепре, Дону, Ангаре и других реках, также будут давать переменный ток.

Такое широкое применение переменного тока объясняется некоторыми его преимуществами перед постоянным. Основное преимущество переменного тока состоит в том, что он позволяет сравнительно просто преобразовывать напряжения, т. е. получать из низкого напряжения высокое и наоборот. Это дает возможность централизованно производить электрическую энергию в мощных электрических станциях (а чем станция мощнее, тем она экономнее) и затем, повысив напряжение до больших величин, при сравнительно небольшой потере энергии в проводах (чем выше напряжение, тем потеря энергии меньше) передавать эту энергию на большие расстояния в потребляющие районы. Вопрос о передаче энергии напряжением постоянного тока пока еще не решен из-за ряда технических трудностей.

Второе преимущество переменного тока в том, что электрические машины переменного тока значительно дешевле в производстве по сравнению с машинами постоянного тока и более надежны в работе.

Наконец, третье преимущество переменного тока заключается в том, что его в случае необходимости всегда можно преобразовать в постоянный.

Впервые переменный ток был применен еще в 1876 году П. Н. Яблочковым для питания изобретенной им электрической свечи. Однако широкое внедрение переменного тока в практику стало возможным лишь после того, как другой наш соотечественник М. О. Доливо-Добровольский в 1891 году осуществил передачу электрической энергии переменным током на сравнительно большое по тому времени расстояние (175 км) и этим доказал целесообразность применения переменного тока. Доливо-Добровольский разработал также все элементы этой передачи: генераторы, трансформаторы и электрические двигатели. Двигатель, созданный Доливо-Добровольским, до настоящего времени используется на практике как самый простой по устройству и дешевый в изготовлении.

После работ Доливо-Добровольского переменный ток за сравнительно короткий срок стал широко применяться во всех цивилизованных странах мира.

§ 56. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. МГНОВЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ИХ СВОЙСТВА

Переменным током называется ток, который с течением времени изменяется по величине и направлению.

С физической точки зрения переменный ток в твердых проводниках представляет собой движение свободных электронов с переменной скоростью и направлением. На практике

используется главным образом синусоидальный переменный ток, т. е. ток, изменяющийся с течением времени по синусоидальному закону.

Для большей наглядности изменение переменного тока часто изображают графиком, как это показано на рис. 84. Подобные графики называются линейными или развернутыми диаграммами переменных электрических величин. Числовые значения, которые принимает переменный ток или какая-либо другая переменная величина (э. д. с., напряжение или мощность) в отдельные моменты времени, называются их мгновенными значениями.

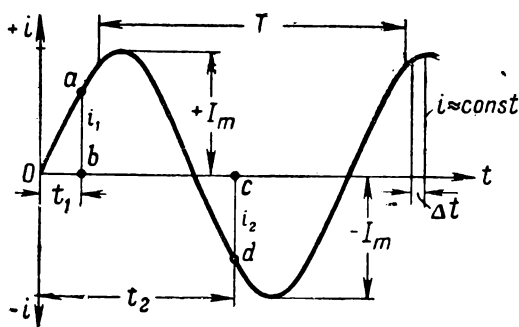


Рис. 84

Мгновенные значения переменного тока легко можно определить по его линейной диаграмме, если она выполнена в соответствующем масштабе. Для этого на оси времени, вправо от ее начала, следует отложить отрезок, соответствующий (в масштабе) заданному моменту времени, и из точки, совпадающей с концом отрезка, восставить перпендикуляр до пересечения с кривой. Отрезок перпендикуляра в принятом масштабе и даст мгновенное значение тока в рассматриваемый момент времени.

Из построений, сделанных на рис. 84, видно, что отрезок перпендикуляра ab соответствует мгновенному значению тока i_1 в момент времени t_1 , а отрезок cd — мгновенному значению тока i_2 в момент времени t_2 . Мгновенных значений на диаграмме можно взять бесчисленное множество, т. е. для каждой точки оси времени.

Положительные и отрицательные мгновенные значения, определяемые по линейной диаграмме, соответствуют прямо противоположным направлениям движения свободных электронов в цепи. Наибольшее из мгновенных значений любой переменной электрической величины называется ее максимальным (амплитудным) значением или амплитудой. Макси-

мальные значения обозначаются большими буквами с индексом m , M , \max или \max .

Мгновенные значения обладают одним очень важным свойством, которое заключается в следующем. За малый промежуток времени Δt (рис. 84) переменная величина практически не изменяется и, следовательно, остается постоянной. А если это так, то к ней можно применить все известные нам законы постоянного тока. Так, если известны, например, мгновенное значение тока i_1 для некоторого момента времени t_1 и сопротивление цепи R , то мгновенное значение напряжения может быть вычислено по известной уже нам формуле

$$u_1 = i_1 R.$$

В этом и заключается свойство мгновенных значений переменных электрических величин. Свойство это не представляет практического интереса, но зато к нему часто прибегают в теории при рассмотрении физических процессов, протекающих в электрических цепях переменного тока.

§ 57. ПЕРИОД И ЧАСТОТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Одна из особенностей переменного синусоидального тока заключается в том, что он является периодически изменяющейся величиной, т. е. величиной, повторяющей свои изменения по истечении некоторого времени. Эта особенность облегчает изучение закономерностей переменного тока. Промежуток времени T , в течение которого переменная величина проходит через все свои мгновенные значения или изменения и в дальнейшем начинает их повторять, называется периодом изменения данной величины. На рис. 84 период показан на произвольном участке оси времени.

За время одного периода переменная величина дважды изменяет свое направление и дважды проходит через максимальное значение (положительное и отрицательное). Единицей измерения периода служит секунда. Совокупность всех изменений, совершаемых переменной величиной за период, называется циклом изменений данной величины или циклом. Таким образом, каждому циклу изменений переменной величины соответствует один период, который фактически представляет собой продолжительность цикла.

Величина, обратная периоду, называется частотой f тока. Физически частота представляет собой количество периодов или циклов переменной величины в секунду. В соответствии с этим частота переменного тока определяется формулой

$$f = \frac{1}{T}, \quad (70)$$

где 1 — одна секунда.

Единицей измерения частоты служит герц (гц или Hz), т. е. такая частота переменной величины, при которой период численно равен одной секунде.

Из формулы (70) период

$$T = \frac{1}{f} \text{ сек.} \quad (71)$$

Применяемый в СССР промышленный переменный ток имеет частоту 50 гц, поэтому период тока

$$T = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ сек.}$$

За одну секунду переменный ток сто раз изменяет свое направление в цепи. Следует отметить, что такая частота тока является очень небольшой, или, как говорят, низкой. В радиотехнике применяют переменные токи частотой в несколько миллионов герц.

§ 58. ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Для получения переменного синусоидального тока необходимо иметь источник с синусоидально изменяющейся электродвижущей силой. Необходимость такого условия подтверждается законом Ома:

$$I = \frac{E}{R + R_0}.$$

Из формулы следует, что характер изменения тока в цепи при неизменном сопротивлении в ней всецело зависит от электродвижущей силы источника. График постоянного тока в цепи изображается прямой линией, параллельной оси времени (рис. 85), и это только потому, что электродвижущая сила источника постоянного тока с течением времени не изменяется.

Рассмотрим, как получается переменная синусоидальная электродвижущая сила у источников переменного тока, называемых иначе генераторами. Генератор состоит из двух главных частей — статора и ротора.

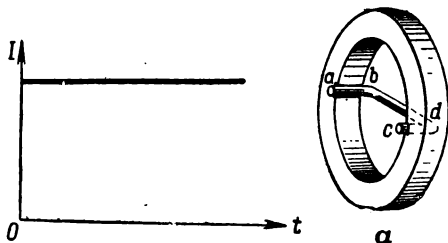


Рис. 85

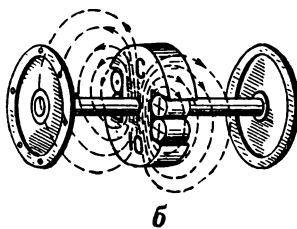


Рис. 86

Статор изготавливается в виде полого стального цилиндра (рис. 86, а), на внутренней поверхности которого в продольных пазах укрепляется обмотка из медной изолированной проволоки, в которой возникает электродвижущая сила. Обмотка показана в виде одного витка с двумя активными сторонами *ab* и *cd*. При работе генератора статор остается неподвижным.

Ротор представляет собой сильный стержневой электромагнит (рис. 86, б), который с помощью вала и боковых крышек с шарикоподшипниками удерживается внутри статора (крышки привинчиваются к статору). По числу полюсов ротора рассматриваемый генератор называется двухполюсным.

Для создания магнитного поля через роторную обмотку (на рис. 86, б показана в разрезе) пропускают постоянный ток от постороннего источника тока (ток в обмотку подводится с помощью двух колец, изолированно укрепленных на валу ротора и соединенных с концами обмоток).

При вращении ротора вместе с ним вращается и его магнитное поле. Это поле пересекает активные стороны витка и наводит в них электродвижущие силы, изменяющиеся по направлению. Изменение направления электродвижущих сил происходит потому, что каждая сторона витка при вращении ротора поочередно пересекается магнитными силовыми линиями прямо противоположного направления (соответственно двум полюсам ротора).

Что же касается взаимного направления обеих электродвижущих сил в витке, то оно всегда получается согласным. В этом можно убедиться, определив направление каждой электродвижущей силы по правилу правой руки (для этого поле ротора необходимо считать неподвижным, а виток вращать в противоположную сторону).

Вследствие согласного направления электродвижущих сил, возникающих в активных сторонах витка, они складываются и дают результирующую электродвижущую силу генератора. Эта электродвижущая сила, как и ее составляющие, также получается изменяющейся по направлению.

Остается пояснить, каким же образом в витке получается синусоидальная электродвижущая сила. Для этого обратимся к формуле $E = Blv$, определяющей электродвижущую силу индукции в проводнике, движущемся в магнитном поле. В этой формуле: l — активная длина проводника в метрах; v — постоянная скорость движения проводника, измеряемая метрами в секунду; B — неизменяющаяся магнитная индукция поля в $\frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$, пропорциональная густоте магнитных силовых линий. Хотя эта формула была получена нами для случая движения проводника в неподвижном поле, ею можно пользоваться и в случае, когда проводник неподвижен, а поле дви-

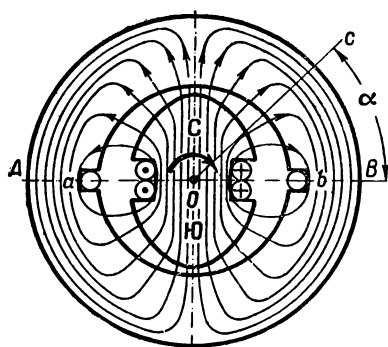


Рис. 87

жется, так как результат возникновения электродвижущей силы от этого не изменяется.

Формула показывает, что синусоидальная электродвижущая сила в витке может быть получена только при соответствующем распределении магнитной индукции, или густоте магнитных силовых линий, в воздушном зазоре между статором и ротором. Требуемое распределение густоты магнитных силовых линий (или магнитной индукции) в зазоре достигается особой формой полюсов ротора на основании того, что воздух для магнитных силовых линий оказывает как бы более значительное сопротивление, чем железо (или другие ферромагнитные тела).

На рис. 87 показано, что благодаря различной длине воздушного зазора между статором и полюсами ротора густота магнитных силовых линий, или магнитная индукция, в зазоре получается различной. У середины полюса магнитная индукция наибольшая, и, наоборот, в местах расположения сторон витка она равна нулю.

При требуемом распределении магнитной индукции в зазоре ее числовое значение b для любой точки на внутренней поверхности статора определяется формулой

$$b = B_m \sin \alpha,$$

где B_m — наибольшая магнитная индукция у середины полюса;

α — угол, составленный линией AB и подвижным радиусом OC , соответствующим точке на поверхности статора, для которой определяется магнитная индукция.

Такое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре генератора называется синусоидальным. Поворачивая подвижный радиус OC из положения, совпадающего с линией OA , хотя бы через каждые 30° , и вычисляя по углу значения магнитной индукции в соответствующих точках по формуле $b = B_m \sin \alpha$, можно построить график распределения этой индукции в зазоре генератора. Из графика (рис. 88) видно, что в двухполюсном генераторе на протяжении всего воздушного зазора, охватываемого углом в 360° , магнитная индукция совершает один полный цикл, т. е. проходит через все свои числовые значения.

Если вращать ротор в направлении, обратном направлению вращения подвижного радиуса OC , то эти же самые значения магнитной индукции можно получить в неподвижных точках a и c , так как при вращении ротора будет изменяться воздушный зазор относительно этих точек, а стало быть, и магнитная индукция, определяемая формулой $b = B_m \sin \alpha$. Однако в этом случае за угол α следует брать угол, на который поворачивается ротор относительно положения, изображенного на рис. 87.

Зная закон распределения магнитной индукции в воздушном зазоре генератора, легко получить формулу для определения мгновенных значений электродвижущей силы в обмотке статора при различных углах поворота ротора относительно его начального положения (рис. 87). Для этого в формулу $E = Blv$ достаточно подставить вместо B значение переменной магнитной индукции $b = B_m \sin \alpha$. Тогда получим

$$e = B_m lv \sin \alpha.$$

В этой формуле произведение $B_m lv$ есть не что иное, как максимальное значение электродвижущей силы в обмотке статора при повороте ротора на угол $\alpha = 90^\circ$ от начального положения. Поэтому можно написать

$$B_m lv = E_m;$$

тогда последняя формула примет вид

$$e = E_m \sin \alpha.$$

Пользуясь полученной формулой, т. е. подставляя в нее разные углы поворота ротора (начиная от $\alpha = 0^\circ$) и вычисляя значения электродвижущей силы (при условии, если известно числовое значение E_m), можно построить в масштабе линейную диаграмму для электродвижущей силы генератора, аналогичную графику распределения магнитной индукции в воздушном зазоре генератора. За один оборот ротора электродвижущая сила совершает один полный цикл своих изменений; в течение следующего оборота эти изменения лишь повторяются.

Имея генератор с синусоидальной электродвижущей силой и подключив к зажимам его обмотки внешнюю цепь, можно получить от него синусоидальный ток и синусоидальное напряжение. Математические выражения для определения мгновенных значений тока и напряжения легко по-

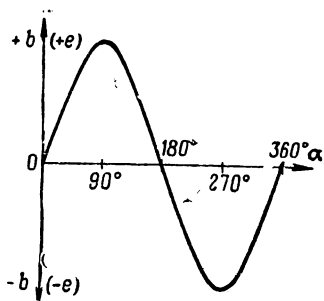


Рис. 88

лучить на основе свойства мгновенных значений. Если известно полное сопротивление цепи R , то для мгновенных значений переменного тока можно написать

$$i = \frac{E_m}{R} \sin \alpha,$$

или

$$i = I_m \sin \alpha,$$

так как $\frac{E_m}{R} = I_m$ есть не что иное, как максимальное значение тока в цепи.

Зная мгновенные значения тока в цепи и сопротивление R_1 во внешнем участке цепи, можно определять и мгновенные значения напряжения на зажимах генератора по формуле

$$u = I_m R_1 \sin \alpha,$$

или

$$u = U_m \sin \alpha,$$

так как $I_m R_1 = U_m$ — максимальное значение напряжения.

Преобразуем несколько полученные нами формулы

$$e = E_m \sin \alpha; i = I_m \sin \alpha; u = U_m \sin \alpha.$$

Выразим угол поворота ротора α через угловую механическую скорость ω и время t :

$$\alpha = \omega t.$$

Подставив значение угла в формулы, получим

$$e = E_m \sin \omega t; i = I_m \sin \omega t; u = U_m \sin \omega t.$$

К этим формулам мы и будем прибегать в дальнейшем при изучении физических процессов, протекающих в цепях переменного тока.

§ 59. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГРАДУСЫ И УГЛОВАЯ ЧАСТОТА

В предыдущем параграфе было показано, что в воздушном зазоре двухполюсного генератора магнитная индукция совершает один полный цикл своих изменений, при этом сам зазор охватывается дугой или углом в 360° . Однако существуют многополюсные генераторы, у которых ротор может иметь любое (целое) число p пар полюсов.

На рис. 89 изображен четырехполюсный генератор, имеющий две пары полюсов ($p=2$). Как видно из рисунка, у этого генератора магнитная индукция в зазоре также распределяется синусоидально (с помощью особой формы полюсов), однако вследствие наличия четырех полюсов индукция претерпевает в зазоре два полных цикла изменений, а каждый цикл охватывается дугой в 180° . Если представить

себе шестиполюсный генератор ($p=3$), то, очевидно, у него магнитная индукция в зазоре будет совершать три цикла, а каждый цикл будет охватываться дугой в 120° . Нетрудно подметить, что у многополюсных генераторов магнитная индукция в зазоре всегда совершает столько циклов, сколько у ротора пар полюсов, т. е. p циклов.

Увеличение числа циклов изменения магнитной индукции в зазоре многополюсных генераторов приводит к тому, что для этих генераторов уже нельзя пользоваться углами, измеряемыми в геометрических градусах, для определения числового значения магнитной индукции в зазоре по формуле $b = B_m \sin \alpha$, а также для определения мгновенных значений электродвижущей силы в проводнике статора по формуле $e = E_m \sin \alpha$.

Действительно, если подвижный радиус OC (рис. 89) из горизонтального положения OA повернуть на угол в -45° по часовой стрелке, то он определит собой в зазоре точку с максимальной магнитной индукцией, в то время как по формуле $b = B_m \sin \alpha$ мы получим всего $-0,707 B_m$, что, конечно, неверно. То же самое получим и для величины электродвижущей силы в проводнике D статора, если повернем ротор из начального положения на угол 45° против часовой стрелки ($e = E_m \sin 45^\circ = 0,707 E_m$).

Такое несоответствие формул объясняется тем, что количество циклов изменения магнитной индукции в зазоре многополюсных генераторов увеличивается, величина же геометрических градусов для всех генераторов остается неизменной. Поэтому в теорию переменного тока ввели электрические градусы.

Поскольку график одного цикла изменений магнитной индукции согласно формуле $b = B_m \sin \alpha$ можно построить только в пределах угла в 360° , то считают, что именно столько градусных единиц и должно всегда заключаться в дуге, на протяжении которой магнитная индукция в воздушном зазоре совершает один полный цикл изменений.

Если в четырехполюсном генераторе (рис. 89) цикл изменений магнитной индукции совершается на участке, охватываемом дугой в 180° , то считают, что в этой же дуге одновременно содержится и 360 электрических градусов. У шестиполюсного генератора цикл охватывается дугой в 120° , но

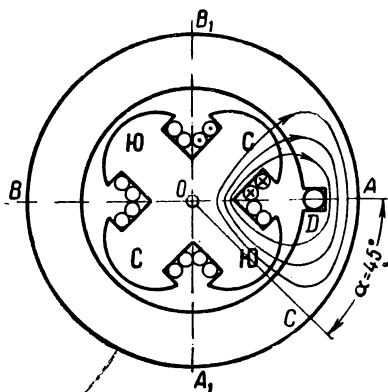


Рис. 89

в ней также должно быть 360 электрических градусов. Получается так, что в многополюсных генераторах каждый геометрический градус делится на p равных частей, каждая из которых и служит электрическим градусом. Следовательно, по величине электрические градусы для каждого генератора различны, а численно всегда в p раз меньше геометрического градуса.

Зная соотношение между электрическим и геометрическим градусами, всегда можно вычислить величину угла поворота ротора в электрических градусах по формуле

$$\alpha_{\text{эл}}^{\circ} = p \alpha_{\text{геом}}^{\circ}, \quad (72)$$

где p — число пар полюсов у ротора генератора;
 $\alpha_{\text{геом}}^{\circ}$ — угол поворота ротора в геометрических градусах.

В двухполюсном генераторе электрические и геометрические градусы равны между собой, поэтому и углы поворота ротора как в геометрических, так и в электрических градусах также получают численно равными.

Воспользуемся формулой (72) для определения величины электродвижущей силы, которая возникает в проводнике D (рис. 89) при повороте ротора на геометрический угол в 45° из начального положения. Для этого вычислим угол поворота ротора в электрических градусах:

$$\alpha_{\text{эл}}^{\circ} = p \alpha_{\text{геом}}^{\circ} = 2 \cdot 45 = 90^{\circ} \text{ электр.}$$

Подставив значение угла в формулу $e = E_m \sin \alpha$, получим

$$e = E_m \sin 90^{\circ} = E_m,$$

что и соответствует действительности.

Итак, с физической точки зрения **электрические градусы учитывают распределение магнитной индукции в воздушном зазоре многополюсного генератора** и поэтому позволяют точно определять мгновенные значения электродвижущей силы, возникающей в проводнике статора.

Наряду с электрическими градусами (по тем же приведенным выше соображениям) в теории переменного тока применяют и электрические радианы. Электрический радиан по величине в p раз меньше геометрического радиана. В дальнейшем будем считать, что угол поворота ротора $\alpha = \omega t$, входящий в формулы $e = E_m \sin \omega t$, $u = U_m \sin \omega t$ и $i = I_m \sin \omega t$, измеряется в электрических градусах или в электрических радианах, а сам угол будем называть электрическим углом.

Угловую скорость вращения ротора ω , выраженную в электрических радианах, будем называть угловой частотой.

§ 60. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТОТЫ ТОКА В ГЕНЕРАТОРАХ И ЕЕ СВЯЗЬ С УГЛОВОЙ ЧАСТОТОЙ

Пусть ротор четырехполюсного генератора (рис. 89), вращаясь с постоянной скоростью, совершает n оборотов в минуту. Установим, от чего зависит частота f электродвижущей силы в проводнике D статора или частота тока в цепи, если генератор питает этим током какой-либо приемник.

Так как ротор имеет две пары полюсов, то за один его оборот электродвижущая сила в проводнике D совершит два полных цикла изменения, а в минуту за n оборотов ротора — $2n$ циклов. Отсюда частота, представляющая собой количество циклов в секунду, может быть определена по формуле

$$f = \frac{2n}{60}.$$

Это означает, что частота электродвижущей силы (или тока) пропорциональна числу пар полюсов ротора и количеству его оборотов в минуту.

В многополюсном генераторе, имеющем p пар полюсов, электродвижущая сила за один оборот ротора совершит p циклов, поэтому формула для определения частоты электродвижущей силы (или тока) в проводнике многополюсного генератора может быть написана так:

$$f = \frac{pn}{60}. \quad (73)$$

Это и есть общая формула для определения частоты переменного тока, получаемого от генераторов. По этой же формуле можно определить число оборотов n ротора:

$$n = \frac{60f}{p} \frac{\text{обороты}}{\text{минута}}. \quad (74)$$

В таком виде формула означает, что для получения определенной частоты переменного тока необходимо, чтобы ротор генератора совершал в минуту строго определенное количество оборотов. Так, для создания промышленной частоты в 50 *гц* ротор двухполюсного генератора ($p = 1$) должен делать 3000 *об/мин*, ротор четырехполюсного генератора — 1500 *об/мин*, шестиполюсного — 1000 *об/мин* и т. д. Таким образом, с увеличением числа пар полюсов ротор генератора должен делать все меньше и меньше оборотов, т. е. вращаться медленнее, чтобы обеспечить одинаковую продолжительность периода (0,02 сек.) изменения электродвижущей силы в проводнике статора.

Между частотой тока f и угловой частотой ω существует зависимость

$$\omega = 2\pi f \frac{\text{радиан}}{\text{секунда}}. \quad (75)$$

Эта зависимость вытекает из таких рассуждений. Если генератор имеет постоянную частоту тока, а следовательно, и одинаковый период изменения переменной электродвижущей силы, то за время этого периода ротор генератора должен обязательно поворачиваться на электрический угол α в 2π радианов (иначе не получится линейная диаграмма одного полного цикла изменений). Зная угол поворота ротора и время T , в течение которого ротор поворачивается на этот угол, можем определить угловую частоту ротора по формуле

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \frac{1}{T} = 2\pi f. \quad (76)$$

Как видим, угловая частота зависит только от требуемой частоты тока и, следовательно, для всех генераторов, вырабатывающих одинаковую частоту, должна быть также одинаковая. Что касается механической угловой скорости ротора, то у различных генераторов, дающих одинаковую частоту, она, как мы уже видели, получается различной и определяется количеством пар полюсов (чем больше пар полюсов у ротора генератора, тем медленнее он должен вращаться при одной и той же частоте).

Такое различие между механической угловой скоростью и угловой частотой ротора объясняется тем, что они измеряются в различных градусах (или радианах).

§ 61. ДЕЙСТВУЮЩИЕ, ИЛИ ЭФФЕКТИВНЫЕ, ЗНАЧЕНИЯ ПЕРЕМЕННЫХ ВЕЛИЧИН

Широкое внедрение переменного тока в практику потребовало прежде всего изыскания наиболее простого способа вычисления электрической энергии, отдаваемой током во внешнюю цепь. Использование законов постоянного тока для мгновенных значений практически нецелесообразно, так как приводит к громоздким вычислениям. Выход был найден на основе использования свойства энергии переходить из одного вида в другой.

Действительно, независимо от характера изменения тока с течением времени всякое прохождение тока по цепи сопровождается выделением тепла, эквивалентного по своему количеству той энергии, которую расходует ток в цепи для преодоления ее сопротивления. Таким образом, о количестве энергии переменного тока в цепи можно судить по тому тепловому эффекту, который ток вызывает при своем прохождении по проводнику.

Для учета этого теплового эффекта в теорию переменного тока и было введено действующее, или эффективное, значение переменного тока. Условились под действующим, или

эффективным, значением переменного тока понимать такое значение эквивалентного ему постоянного тока, который, проходя по тому же, что и переменный ток, проводнику с сопротивлением R , за равное время выделяет в этом проводнике одинаковое количество тепла (по сравнению с переменным током).

В соответствии с этим определением действующее значение переменного тока обозначается буквой I , т. е. точно так же, как и величина тока в цепях постоянного тока. Между максимальным и действующим значениями переменного тока существует зависимость

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}. \quad (77)$$

По тем же самым соображениям введены также действующие значения электродвижущей силы и напряжения. Эти значения соответственно обозначаются буквами E и U . Между максимальными и действующими значениями электродвижущей силы и напряжения существуют аналогичные зависимости

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \text{ и } U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Действующие значения очень удобны, и ими исключительно пользуются на практике.

Зная действующее значение тока в цепи, можно вычислить мощность переменного тока, а стало быть, и энергию по известным уже формулам

$$P = I^2 R \text{ и } W = Pt,$$

где R — сопротивление в цепи переменного тока.

На практике действующие значения в цепях переменного тока определяют электрическими измерительными приборами (амперметрами и вольтметрами), которые градуируются с помощью тепловых приборов постоянного тока (гл. VII).

§ 62. ФАЗЫ ПЕРЕМЕННОЙ ВЕЛИЧИНЫ И ФАЗОВЫЙ УГОЛ. ВЕЛИЧИНЫ, СОВПАДАЮЩИЕ И СДВИНУТЫЕ ПО ФАЗЕ

Любая переменная электрическая величина, будь то величина тока, напряжения или электродвижущей силы, в течение периода проходит через все свои стадии изменения. Эти отдельные стадии изменения переменной величины называются ее фазами.

Каждой фазе соответствует определенное мгновенное значение переменной величины, но оно характеризует фазу лишь с количественной стороны. Для полного представления о фазе необходимо учитывать и ее качественное отличие от

других фаз в смысле тех условий, при которых она возникает.

Чтобы понять качественное различие между фазами, обратимся к линейной диаграмме тока, изображенной на рис. 90. На этой диаграмме показаны четыре мгновенных значения тока i_1 , i_2 , i_3 и i_4 за период, которые численно равны между собой, но попарно противоположны по знаку. Очевидно, этим четырем мгновенным значениям соответствуют и четыре фазы переменного тока.

Если исходить только из мгновенных значений (количественная сторона), то можно сказать, что первые две фазы, которым соответствуют токи i_1 и i_2 , ничем не различаются, так как каждая из них характеризуется одинаковым мгновенным значением как по величине, так и по знаку. То же самое можно сказать и о других двух фазах. Различие между первой и второй парами фаз заключается в том, что мгновенные значения тока у них разные по знаку.

Если же учесть и качественную сторону фаз, то все четыре фазы оказываются отличными одна от другой по тому или иному признаку. Проследим за различиями фаз по линейной диаграмме (рис. 90).

В первую фазу ток приходит в результате своего увеличения и имеет одно определенное (условное положительное) направление в цепи. Во второй фазе ток не изменяет своего направления, но зато приходит в эту фазу в результате уменьшения.

В третью фазу, как и в первую, ток приходит в результате увеличения, но изменяет направление на противоположное. Наконец, в четвертую фазу, как и во вторую, ток приходит в результате уменьшения, но по сравнению со второй фазой имеет другое направление.

Таким образом, каждая фаза от другой отличается тем или иным качественным признаком. На линейной диаграмме (рис. 90) каждая фаза определяется электрическим углом ωt (углы ωt_1 , ωt_2 , ωt_3 и ωt_4), который поэтому называют также фазовым углом. В некоторых учебниках для упрощения фазой называют фазовый угол, что, конечно, неверно и должно пониматься лишь условно.

В дальнейшем нам придется иметь дело с электрическими величинами, совпадающими и не совпадающими по фазе. Две какие-либо переменные величины (например, ток и напряжение) называются **совпадающими по фазе**, если они изменяются по одному и тому же закону (в нашем

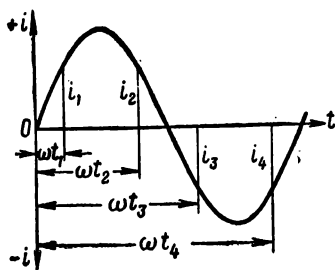


Рис. 90

случае по синусоидальному) и одновременно проходят через соответственные фазы. При отсутствии последнего условия величины называются **не совпадающими** или **сдвинутыми по фазе**.

На рис. 91, *а* изображены линейные диаграммы тока и напряжения, которые совпадают по фазе, а на рис. 91, *б* эти же величины показаны не совпадающими по фазе. Электрический угол, на который сдвинуты между собой по времени одинаковые фазы двух рассматриваемых величин, называется **углом сдвига фаз**. Этот угол принято обозначать буквой φ . Как видно из рис. 91, *б*, угол сдвига между одинаковыми фазами тока и напряжения составляет 90° .

На линейных диаграммах угол сдвига фаз можно указывать между двумя любыми одинаковыми фазами величин, однако удобнее всего его указывать между фазами, которым соответствуют одинаковые по знаку максимальные значения этих величин (эти фазы проще находятся по линейным диаграммам). Угол φ не может превышать 180° , как это видно из рис. 92, *а*. В цепях переменного тока, которые мы будем рассматривать в дальнейшем, угол сдвига фаз между переменными величинами всегда получается меньше 90° .

В сдвинутых по фазе величинах следует различать опережающую и отстающую по фазе величины. Та из двух величин, которая раньше проходит через свои фазы в пределах угла 180° , называется **опережающей**, а другая — **отстающей** от нее на тот же самый угол φ .

Опережающую или отстающую величину на линейных диаграммах проще всего установить по ее амплитуде. Для этого находят на оси времени участок, который лежит в пределах угла в 180° и включает в себя одинаковые по знаку амплитуды двух рассматриваемых величин. После этого перемещаются по участку вправо от его начала и замечают первую встречающуюся амплитуду. Величина, к которой относится амплитуда, и будет опережающей по отношению к другой величине. Применяв указанный прием к случаю, приведенному на рис. 91, *б*, найдем, что напряжение опережает ток на угол $\varphi = 90^\circ$.

При угле φ , равном 180° , понятия об опережающей и отстающей величинах не имеют смысла, так как одинаковые

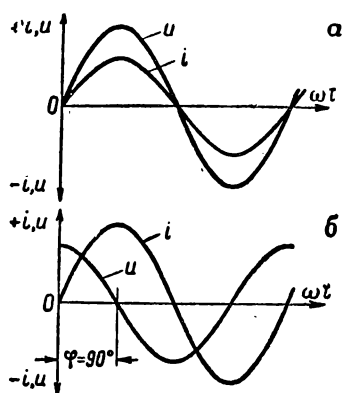
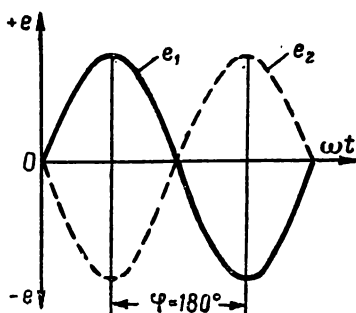


Рис. 91



фазы двух величин чередуются через каждые 180° (рис. 92) и любую из двух величин можно принять как за опережающую, так и за отстающую.

Угол сдвига фаз двух переменных величин можно обозначать не только на линейных диаграммах, но и математически, используя для этого формулы

$$i = I_m \sin \omega t; u = U_m \sin \omega t;$$

$$e = E_m \sin \omega t.$$

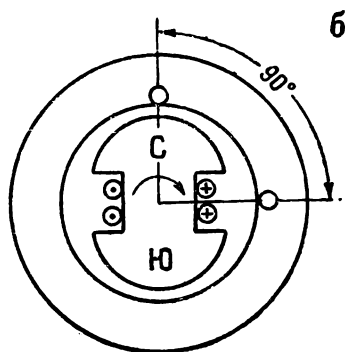


Рис. 92

б

Так, если напряжение опережает ток на некоторый угол φ , то этот угол прибавляют к электрическому углу ωt , входящему в формулу $u = U_m \sin \omega t$. Если же напряжение отстает от тока на угол φ , то его отнимают от угла ωt . Исходя из этого правила, для тока и напряжения соответственно их линейным диаграммам, изображенным на рис. 91, б, можно написать

$$u = U_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right); i = I_m \sin \omega t.$$

В случае опережения тока на угол $\varphi = 90^\circ$ его формула принимает вид

$$i = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right).$$

Угол сдвига фаз между током и напряжением, прибавляемый к углу ωt или вычитаемый из него, называется углом начальной фазы или просто начальной фазой и в общем виде обозначается буквой ψ .

В качестве примера на рис. 92, б показано возникновение угла сдвига фаз между электродвижущими силами двух проводников генератора. Вследствие того что проводники смещены один относительно другого на 90° , электродвижущие силы, возникающие в них, также сдвинуты на 90° , причем опережающая электродвижущая сила наводится в верхнем проводнике при данном направлении вращения ротора.

§ 63. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Линейная диаграмма не является единственным графическим способом изображения закона изменения переменной электрической величины. В теории переменного синусоидального тока наряду с линейной диаграммой пользуются также и векторной диаграммой. На векторной диаграмме закон изменения переменной величины изображается при помощи проекций вращающегося вектора на вертикальную ось. Возможность такого изображения объясняется тем, что проекции вращающегося вектора, как и мгновенные значения переменной синусоидальной величины, изменяются с течением времени по синусоидальному закону.

Рассмотрим более подробно векторную диаграмму и ознакомимся с ее преимуществами, которые она имеет перед линейной диаграммой.

Пусть вектор $\overline{I_m}$ в принятом масштабе изображает максимальное значение переменного тока и в своем начальном положении совпадает с горизонтальной осью CD (рис. 93). Повернем вектор против часовой стрелки на некоторый угол ωt_1 и определим проекцию этого вектора на ось AB . Из прямоугольного треугольника oac величину проекции oa можно определить по формуле

$$oa = I_m \sin \omega t_1.$$

Сравнивая полученный результат с известной уже нам формулой $i = I_m \sin \omega t$, видим, что проекция вектора в том же масштабе представляет собой мгновенное значение тока в момент времени t_1 .

Поворачивая вектор $\overline{I_m}$ на различные углы (в пределах 360°) относительно его начального положения, таким же путем можно определить все мгновенные значения тока за время одного периода T . Знак мгновенных значений определяется синусом угла, на который поворачивается вектор $\overline{I_m}$. Чтобы можно было отсчитывать мгновенные значения по проекциям прямо в амперах, масштаб, принятый для вектора $\overline{I_m}$, наносится непосредственно на ось AB , как показано на рис. 93.

Графическое изображение мгновенных значений синусои-

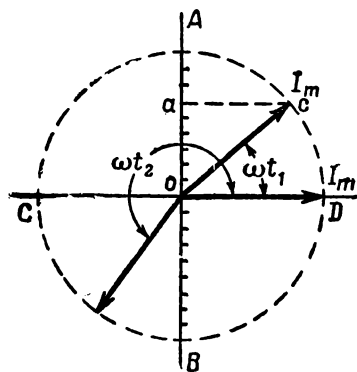


Рис. 93

дальной переменной величины описанным способом и называется ее **векторной диаграммой**.

На чертеже невозможно одновременно показать закономерность изменения проекций вращающегося вектора. Однако можно представить себе, что вектор вращается с постоянной угловой скоростью ω , и мысленно следить за его проекциями: они будут то увеличиваться от нуля до наибольшего значения (при углах 90° и 180°), то уменьшаться до нуля по обе стороны от оси CD .

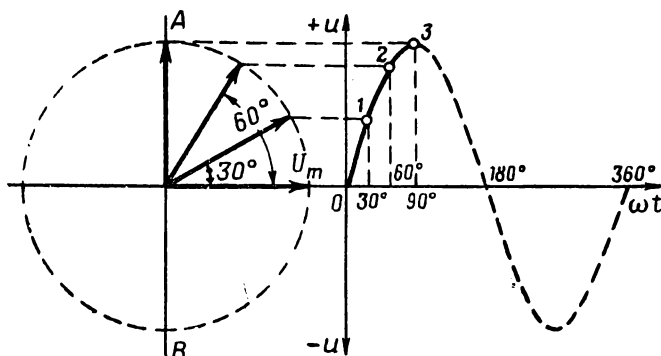


Рис. 94

Из-за невозможности показать такое изменение проекций вектора условились векторную диаграмму на чертежах изображать одним неподвижным вектором без обозначения осей AB и CD . Как увидим дальше, такая условность вполне приемлема, так как к повороту вектора для определения мгновенных значений переменных величин прибегают сравнительно редко.

Вследствие того что вращающийся вектор представляет мгновенные значения переменной величины, можно довольно просто строить и линейные диаграммы, которые иногда называют также развернутыми векторными диаграммами.

На рис. 94 показано построение линейной диаграммы для переменного напряжения $u = U_m \sin \omega t$ с помощью проекций вектора \overline{U}_m . Построение заключается в том, что вектор \overline{U}_m после каждого его поворота на угол в 30° проектируется на отрезки перпендикуляров (показаны пунктиром), которые восставляются из точек оси времени, соответствующих углам поворота вектора. Верхние точки проекций (1, 2, 3 и т. д.) соединяются плавной линией и дают линейную диаграмму. Масштаб для вертикальной оси диаграммы такой же, как и для вектора \overline{U}_m , а для оси времени произвольный.

Из рис. 94 видно, что для получения линейной диаграммы, соответствующей одному полному циклу изменений напряже-

ния (за время одного периода), вектор \overline{U}_m необходимо повернуть на 360° . Если же взять два вращающихся вектора, например \overline{I}_m и \overline{U}_m (рис. 95), образующих неизменный угол φ , то по их проекциям можно построить две линейные диаграммы, сдвинутые между собой на тот же угол φ (на рис. 95 угол $\varphi = 90^\circ$). Поэтому угол сдвига фаз принято указывать непосредственно между векторами, изображающими максимальные значения электрических величин, что гораздо проще и не требует вычерчивания линейных диаграмм.

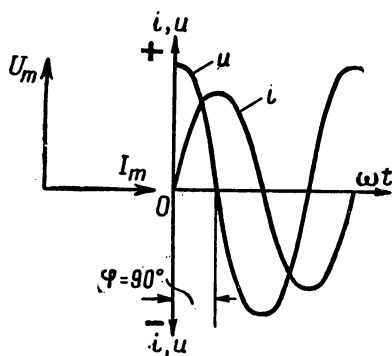


Рис. 95

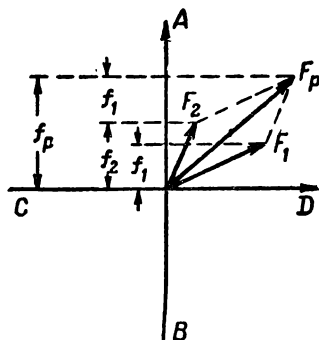


Рис. 96

Если сравнить между собой линейные и векторные диаграммы, то можно прийти к следующим выводам.

Линейные диаграммы дают большую наглядность изменения переменных величин за весь период, и в этом их большое преимущество перед векторными. Но линейные диаграммы труднее чертить, и здесь бесспорное преимущество за векторными диаграммами. Однако простота вычерчивания векторных диаграмм — не единственное и не главное их преимущество. Главное преимущество заключается в том, что по векторным диаграммам легко производить сложение однородных переменных величин и их разложение на составляющие. Благодаря этому вектор собственно и введен в теорию переменного тока.

Чтобы понять, как складываются переменные однородные величины с помощью векторных диаграмм, вспомним теорему о том, что проекция результирующего вектора на какую-либо ось всегда равна сумме проекций составляющих векторов. В самом деле, проекция результирующего вектора \overline{F}_p на ось AB , как видно из рис. 96, равна сумме проекций векторов \overline{F}_1 и \overline{F}_2 на ту же ось (проекции векторов обозначены буквами f_p , f_1 и f_2).

Вследствие равенства противоположных сторон параллелограмма вектор \overline{F}_1 можно считать перенесенным параллельно

самому себе в верхнее положение, поэтому его проекция f_1 на ось AB от этого не изменяется. Из рисунка видно, что между проекциями всех трех векторов, действительно, существует зависимость

$$f_p = f_1 + f_2,$$

отмеченная в теореме.

Зависимость, конечно, не изменится от того, какое положение будут занимать векторы относительно оси AB . Эта зависимость и позволяет складывать однородные переменные величины. Посмотрим, как осуществляется сложение на примере.

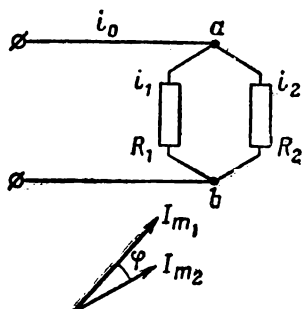


Рис. 97

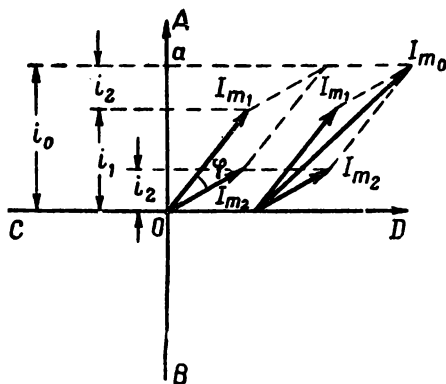


Рис. 98

Пусть генератор переменного тока питает два приемника R_1 и R_2 , соединенных параллельно (рис. 97). Будем считать, что максимальные значения токов приемников нам известны, причем сами токи сдвинуты между собой по фазе на некоторый угол φ , как это показано на векторной диаграмме. Определим действующее значение общего тока i_0 , поступающего в цепь от генератора.

Применив первое правило Кирхгофа в отношении точки a , мы можем написать для общего тока следующее равенство

$$i_0 = i_1 + i_2.$$

Равенство означает, что для нахождения мгновенного значения общего тока в любой момент времени нужно сложить мгновенные значения токов обоих приемников в тот же момент времени.

Воспользуемся векторной диаграммой токов для определения их мгновенных значений и произведем такое сложение для какого-либо момента времени. Для этого расположим векторы \vec{I}_{m1} и \vec{I}_{m2} как угодно относительно оси AB , не изменяя угла φ между ними, и затем возьмем проекции векторов на эту ось (рис. 98). Сложив полученные проекции i_1 и i_2

(в масштабе тока), получим мгновенное значение общего тока, которое выражается равенством

$$i_0 = i_1 + i_2.$$

Обратившись снова к теореме о проекциях векторов, мы можем утверждать, что отрезок Oa на оси AB , представляющий собой (в масштабе) мгновенное значение общего тока i_0 , есть не что иное, как проекция результирующего вектора \overline{I}_{m0} , который получается от сложения векторов \overline{I}_{m1} и \overline{I}_{m2} по правилу параллелограмма (чтобы не усложнять чертеж, на рис. 98 сложение векторов показано отдельно). С физической точки зрения этот результирующий вектор и представляет собой максимальное значение общего тока, так как его проекция удовлетворяет равенству $i_0 = i_1 + i_2$.

Зная амплитуду общего тока, мы можем определить и его действующее значение из соотношения

$$I_0 = \frac{I_{m0}}{\sqrt{2}}.$$

Полученная нами в результате геометрического сложения векторов \overline{I}_{m1} и \overline{I}_{m2} амплитуда общего тока I_{m0} свидетельствует о том, что общий ток i_0 , как и составляющие токи i_1 и i_2 , изменяется по закону синуса, так как по проекциям вектора \overline{I}_{m0} также можно построить линейную диаграмму и она будет иметь вид синусоиды.

Следовательно, переменные синусоидальные величины после сложения **сохраняют синусоидальный закон своего изменения**, что существенно облегчает исследования явлений в цепях переменного тока.

Мы произвели сложение только двух переменных величин. Таким же путем, т. е. по правилу параллелограмма (или многоугольника), можно сложить любое число однородных величин. Этим же путем можно производить и обратное действие — разложение электрических величин на две составляющие, сдвинутые между собой на любой угол φ .

Сложение и разложение переменных величин с помощью векторов широко используются в теории переменного тока и значительно упрощают исследование сложных физических процессов. Однако не нужно забывать, что геометрическое сложение и вычитание векторов возможны только при синусоидальном переменном токе. При другом характере изменения тока проекции вращающегося вектора уже не будут соответствовать мгновенным значениям тока, а следовательно, и не позволят производить геометрические действия над электрическими величинами (вернее, над векторами этих величин).

В заключение рассмотрим некоторые правила, которые нужно соблюдать при пользовании векторами.

Первое правило касается знака угла сдвига фаз (φ) между векторами. Для определения знака угла на векторных диаграммах этот угол **необходимо откладывать от вектора тока к вектору напряжения** (или электродвижущей силы) **по наикратчайшему угловому расстоянию**. Знак угла при этом определяется по правилу тригонометрии: угол, откладываемый против часовой стрелки, считается положительным, а по часовой стрелке — отрицательным.

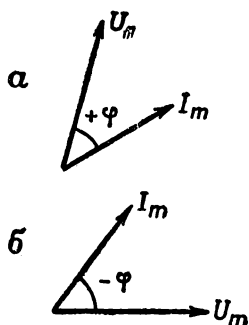


Рис. 99

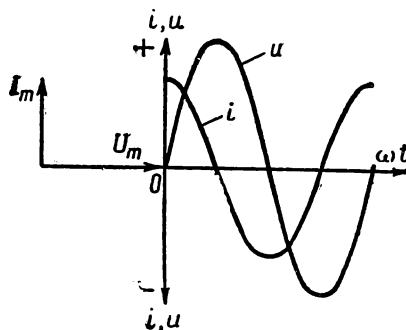


Рис. 100

В соответствии с этим правилом на рис. 99, *а* угол сдвига фаз между током и напряжением следует считать положительным (откладывается против часовой стрелки), а на рис. 99, *б* — отрицательным.

Второе правило заключается в том, что **при геометрическом сложении однородных величин они должны иметь одинаковую частоту** (при разных частотах угол сдвига фаз между величинами не остается постоянным).

Третье правило говорит о том, что **изображать векторами можно прямо действующие значения переменных величин, как пропорциональные максимальным** (при таком изображении изменяется лишь масштаб параллелограмма векторов в $\sqrt{2}$).

Наконец, при одновременном изображении линейных и векторных диаграмм (рис. 100) векторы принято располагать левее линейных диаграмм, причем так, чтобы их проекции на ось соответствовали мгновенным значениям переменных величин по линейным диаграммам для момента времени $t = 0$.

§ 64. СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ

Один и тот же проводник оказывает различные сопротивления постоянному и переменному токам. Для переменного тока сопротивление всегда получается больше, чем для по-

стоянного, причем разни́ца в величине сопротивлений возрастает с увеличением частоты переменного тока. Поэтому условились **сопротивление проводника переменному току называть активным, а постоянному — омическим**. При малых частотах (до 100 гц) активное и омическое сопротивления отличаются незначительно, и в этом случае сопротивление проводника переменному току называют иногда омическим.

Повышенная величина активного сопротивления по сравнению с омическим объясняется явлением поверхностного эффекта. Это явление заключается в том, что плотность переменного тока, т. е. количество электричества, проходящего в секунду через единицу площади поперечного сечения, в различных слоях проводника получается неодинаковой. В центральных слоях эта плотность наименьшая, а в поверхностном слое наибольшая. Таким образом, переменный ток как бы вытесняется к поверхностному слою проводника, отсюда и само явление получило название поверхностного эффекта.

Неравномерное распределение переменного тока в поперечном сечении проводника приводит к неполному использованию этого сечения, т. е. как бы уменьшает его площадь S , в результате чего и возрастает сопротивление проводника, как это следует из формулы

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

Явление поверхностного эффекта вызывается различной величиной сил F_m магнитного поля, действующих на свободные электроны в проводнике. При рассмотрении вопроса об энергии магнитного поля (§ 50) было показано, что силы собственного магнитного поля проявляются только при изменении тока в проводнике (когда магнитные силовые линии поля перемещаются), противодействуя всякому изменению скорости движения свободных электронов.

Величина силы магнитного поля, действующей на отдельные электроны, может быть определена по формуле

$$F_m = \frac{2iqv}{r}, \quad (78)$$

где i — мгновенное значение тока в проводнике;

q — величина заряда электрона;

r — расстояние электрона от геометрической оси проводника;

v — скорость перемещения магнитного поля относительно электрона (при изменении тока в проводнике магнитные силовые линии то приближаются к геометрической оси проводника, то удаляются от нее со скоростью, соответствующей скорости изменения тока).

Из формулы видно, что наибольшую величину сила F_m имеет в слоях, близко расположенных к геометрической оси проводника, и наименьшую в поверхностном слое. Различие в величине сил и приводит к тому, что электроны в проводнике вытесняются в сторону поверхностного слоя, где силы магнитного поля оказывают им меньшее противодействие.

С увеличением частоты переменного тока период его изменения уменьшается ($T = \frac{1}{f}$), поэтому скорость v перемещения поля относительно электронов соответственно увеличивается (чтобы совершить одно и то же перемещение в пространстве за меньшее время, поле должно двигаться быстрее). Одновременно с увеличением скорости перемещения поля увеличиваются и силы магнитного поля согласно формуле (78), при этом различие в величине сил, действующих в центральных и поверхностных слоях, также возрастает. Это ведет к еще большему вытеснению тока (электронов) к поверхностному слою и, следовательно, к дальнейшему увеличению активного сопротивления проводника.

При очень больших частотах, используемых в радиотехнике, переменный ток практически проходит по поверхностному слою проводника, поэтому для экономии металла при больших частотах применяют полые проводники (в виде трубок), покрывая их сверху тонким слоем серебра для улучшения проводимости.

Однако активное сопротивление не является единственным для переменного тока. Дело в том, что переменный ток сопровождается еще двумя явлениями, которые резко отличают его от постоянного тока. Одно из этих явлений заключается в непрерывном индуктировании электродвижущей силы самоиндукции в цепи, другое сводится к тому, что любая цепь при прохождении переменного тока проявляет себя одновременно и как конденсатор с некоторой емкостью.

Электродвижущая сила самоиндукции и емкость цепи оказывают влияние на величину действующего значения переменного тока, поэтому они должны как-то учитываться. Для их учета в теории переменного тока введены еще два сопротивления — индуктивное X_L и емкостное X_C . Характер влияния электродвижущей силы самоиндукции и емкости цепи на величину действующего значения тока состоит в следующем.

Известно, что электродвижущая сила самоиндукции согласно правилу Ленца препятствует всякому изменению электрического тока в цепи, она, например, задерживает нарастание тока и уменьшает амплитуду I_m , что приводит к уменьшению его действующего значения $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$. На рис. 101 сплошной линией изображена кривая тока для случая, когда электродвижущая сила самоиндукции в цепи отсутствует,

а пунктиром — кривая, соответствующая наличию в этой цепи электродвижущей силы самоиндукции. Действие электродвижущей силы самоиндукции учитывается индуктивным сопротивлением X_L .

Влияние емкости цепи на величину действующего значения переменного тока можно пояснить так. Если, например, выключить рубильник и таким образом отсоединить приемник от источника постоянного тока (рис. 102, а), то тока в цепи не будет. Если же приемник питать от генератора переменного тока (рис. 102, б), то при выключенном рубильнике чувствительный амперметр будет показывать некоторый ток в цепи. Объясняется это тем, что провода, питающие прием-

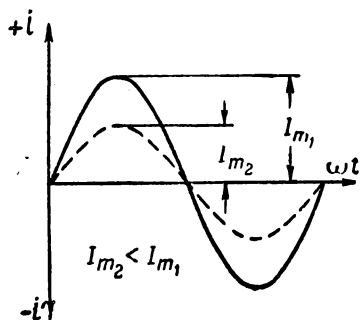


Рис. 101

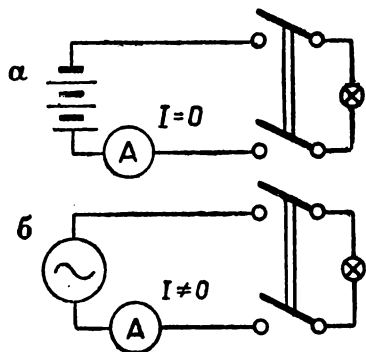


Рис. 102

ник, представляют собой конденсатор, благодаря которому в цепи поддерживаются зарядный и разрядный токи. Эти токи складываются с током приемника при включенном рубильнике и приводят к некоторому увеличению действующего значения тока, поступающего от генератора.

В реальных условиях любая цепь обладает той или иной емкостью хотя бы из-за наличия проводов, соединяющих ее с источником тока. Влияние емкости цепи на величину действующего значения переменного тока учитывается емкостным сопротивлением X_C .

Таким образом, реальные цепи переменного тока обладают одновременно всеми тремя сопротивлениями (активным, индуктивным и емкостным). Но прежде чем перейти к изучению таких цепей, нам необходимо ознакомиться сначала с простейшими (теоретическими) цепями, т. е. включающими в себя только по одному из трех сопротивлений. Без предварительного знакомства с простейшими цепями невозможно понять физические процессы, происходящие в реальных цепях. Простейшие цепи входят в состав реальных цепей в качестве их отдельных неразветвленных участков.

В целях привития учащимся навыков в самостоятельном изучении цепей переменного тока мы будем рассматривать в дальнейшем отдельные цепи в такой последовательности:

1. Характеристика цепи и ее электрическая схема.
2. Исходные данные о цепи.
3. Математическое исследование цепи.
4. Физический смысл процессов, происходящих в цепи.
5. Выводы по особенностям цепи.

§ 65. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Цепи, включающие в себя электрические лампы, нагревательные приборы, реостаты, а также питающие провода, по своему характеру приближаются к цепям, имеющим только одно активное сопротивление. Для генератора переменного

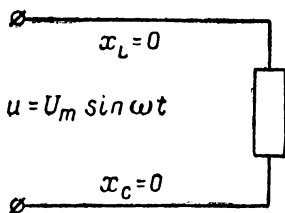


Рис. 103

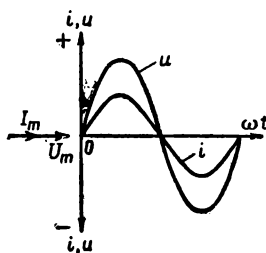


Рис. 104

тока перечисленные приемники называются **активной нагрузкой**. Индуктивное и емкостное сопротивления этих приемников настолько незначительны, что ими пренебрегают.

На электрических схемах цепь с активным сопротивлением изображается так, как показано на рис. 103. О цепи известны следующие данные:

- 1) цепь обладает только активным сопротивлением R , измеряемым в омах;
- 2) к зажимам цепи подведено синусоидальное переменное напряжение $u = U_m \sin \omega t$.

Для уяснения физической сущности процессов, происходящих в этой цепи, необходимо:

- 1) построить линейные и векторные диаграммы для тока и напряжения;
- 2) получить формулы для определения действующего значения тока и для вычисления мощности, потребляемой цепью.

Зная, по какому закону изменяется приложенное напряжение, мы можем построить для него линейную и векторную диаграммы (рис. 104). Ток в цепи также будет изменяться по

синусоидальному закону, однако нужно установить, будет ли он совпадать по фазе с напряжением или нет.

Так как для мгновенных значений переменного тока применимы те же формулы, что и для постоянного тока, то мгновенное значение тока в цепи может быть выражено по закону Ома

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t,$$

где $I_m = \frac{U_m}{R}$ — максимальное значение тока.

Сравнивая выражения $i = I_m \sin \omega t$ и $u = U_m \sin \omega t$, видим, что ток совпадает по фазе с напряжением, так как одновременно с ним проходит через одинаковые фазы (электрический угол ωt при любом значении t в обоих выражениях получается одинаковый). На основании этого строим диаграмму тока (рис. 104).

Для определения действующего значения тока в цепи достаточно обе части равенства $I_m = \frac{U_m}{R}$ разделить на $\sqrt{2}$. Получим

$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}R},$$

или

$$I = \frac{U}{R}, \quad (79)$$

где $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ — действующее значение тока;

$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ — действующее значение напряжения.

Формула (79) представляет собой математическое выражение следствия из закона Ома для рассматриваемой цепи. Как видим, она ничем не отличается от такой же формулы для постоянного тока.

Нам осталось получить формулу для вычисления мощности, потребляемой цепью, или, что одно и то же, мощности тока, расходуемой в цепи. Мгновенная мощность тока, т. е. мощность, расходуемая им в отдельные моменты времени, может быть выражена так

$$p = ui,$$

или

$$p = U_m I_m \sin^2 \omega t.$$

По этому выражению построим линейную диаграмму (рис. 105). Из диаграммы видно, что мощность, расходуемая током в цепи, все время изменяется. Поэтому под мощностью

(P) переменного тока условились понимать ее среднее арифметическое значение за период (T). Для определения среднего значения мощности достаточно энергию (W), расходуемую током в течение периода, разделить на продолжительность периода. Следовательно, мощность переменного тока можно вычислять по формуле

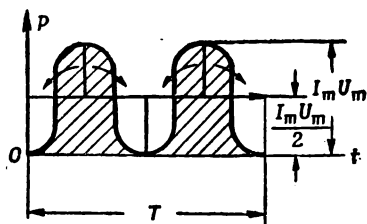


Рис. 105

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

Энергию, расходуемую током за период, легко определить по линейной диаграмме мощности, так как криволинейная площадь, ограниченная

диаграммой и осью времени, в соответствующем масштабе численно равна величине этой энергии.

Превратив криволинейную площадь в площадь равновеликого ей прямоугольника (рис. 105), мы можем энергию тока подсчитать по формуле

$$W = \frac{I_m U_m}{2} T.$$

Подставив значение энергии в выражение $P = \frac{W}{T}$, получим

$$P = \frac{W}{T} = \frac{U_m I_m T}{2T} = \frac{U_m I_m}{2},$$

или

$$P = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Отсюда

$$P = UI \text{ ватт.} \quad (80)$$

Это и есть формула для вычисления мощности, которую расходует переменный ток в рассматриваемой цепи. Как видим, формула также ничем не отличается от формулы для вычисления мощности в цепи постоянного тока.

Выводы.

1. В цепи с одним только активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе ($\varphi = 0$). Ток, совпадающий по фазе с напряжением, называется **активным** или **ваттным** током, так как он расходует в цепи мощность, определяемую формулой

$$P = UI \text{ ватт.}$$

2. Действующие значения переменных величин I , U в цепи с активным сопротивлением подчиняются всем законам по-

стоянного тока. Поэтому, пользуясь формулами (79) и (80), можно вычислять и другие электрические величины цепи: энергию $W = Pt$, падение напряжения $U = IR$ и т. д.

§ 66. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Цепь с одним только индуктивным сопротивлением приближенно может быть представлена в виде катушки, состоящей из большого числа витков медной изолированной проволоки с достаточно большим поперечным сечением. Активным сопротивлением такой катушки вследствие большого поперечного сечения проволоки можно пренебречь; емкостное же сопротивление ее невелико, и мы его в расчет не принимаем.

На электрических схемах цепь с индуктивным сопротивлением изображается в виде соленоида (рис. 106). Об этой цепи нам известно следующее:

1) цепь обладает некоторым коэффициентом самоиндукции L , измеряемым в генри;

2) к зажимам цепи подведено синусоидальное переменное напряжение $u = U_m \sin \omega t$.

Как и для предыдущей цепи, необходимо:

1) построить линейные и векторные диаграммы для тока и напряжения;

2) получить формулы закона Ома и мощности для цепи.

Имея заданным приложенное напряжение к цепи, построим линейную и векторную диаграммы (рис. 107).

Для установления угла сдвига фаз между током и напряжением исходим из того, что переменный ток своим магнитным полем все время наводит в цепи электродвижущую силу самоиндукции e_L . Эта электродвижущая сила в любой момент времени должна быть равна по величине приложенному

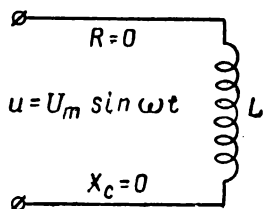


Рис. 106

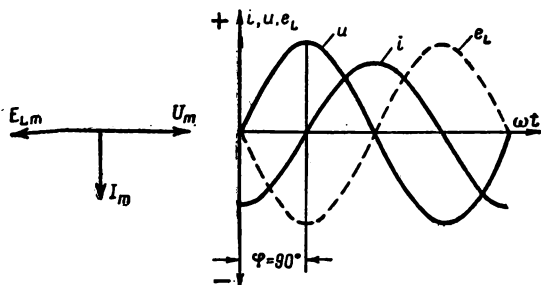


Рис. 107

напряжению, но иметь противоположное направление. Следовательно, возникающая в цепи электродвижущая сила самоиндукции также должна изменяться синусоидально, но иметь угол сдвига фаз с напряжением в 180° , как это показано на рис. 107.

Такое соотношение между приложенным напряжением и электродвижущей силой самоиндукции подтверждается их физическим смыслом. В самом деле, мгновенные значения приложенного напряжения представляют собой энергию, которую источник сообщает каж-

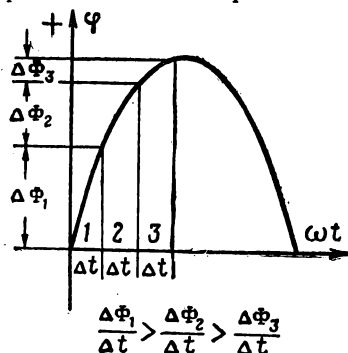


Рис. 108

дому единичному заряду, проходящему по цепи. Если в цепи нет активного сопротивления, энергия единичного заряда может превратиться лишь в энергию магнитного поля, создаваемого током (по закону сохранения энергии). Но мы уже знаем (§ 50), что энергия, расходуемая источником тока на преодоление сил магнитного поля, и есть электродвижущая сила самоиндукции, возникающая в цепи.

Таким образом, в данной цепи приложенное напряжение в любой момент времени равно электродвижущей силе самоиндукции. Противоположность направления этих величин объясняется тем, что каждой из них соответствуют силы, оказывающие противоположно направленные действия на единичные электрические заряды. Так, если приложенному напряжению соответствуют силы электрического поля источника тока, которые собственно и вызывают движение единичных зарядов (ток) в цепи, то электродвижущей силе самоиндукции соответствуют силы магнитного поля, противодействующие этому движению.

Зная закон изменения электродвижущей силы самоиндукции и пользуясь формулой $e_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$, можно найти на оси времени (рис. 107) моменты перехода тока через нулевые, а также положительные и отрицательные значения и этим самым определить его угол сдвига фаз относительно напряжения.

Из построений, сделанных на рис. 108, видно, что наибольшую скорость изменения $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ переменный синусоидальный ток имеет в моменты нарастания от нулевого значения. Следовательно, в эти моменты и электродвижущая сила самоиндук-

ции в цепи должна иметь максимальное значение E_{Lm} согласно формуле

$$e_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Возвратившись теперь к рис. 107, мы можем утверждать, что линейная диаграмма тока должна пересекать ось времени в точках, соответствующих максимальным значениям электродвижущей силы самоиндукции (т. е. при углах 90° и 270° от начала координат).

Относительные значения тока легко определить по правилу Ленца: они должны быть противоположны по знаку электродвижущей силе самоиндукции при нарастании тока в цепи и, наоборот, иметь одинаковый с ней знак при уменьшении тока.

Изображенная на рис. 107 линейная диаграмма тока и построена на основе этих соображений (в первой четверти периода ток уменьшается, поэтому e_L имеет одинаковое с ним направление; во второй четверти ток увеличивается, а э. д. с. самоиндукции e_L направлена по отношению к нему противоположно).

Из диаграммы видно, что в данной цепи ток отстает от напряжения на угол $\varphi = +90^\circ$. Такое отставание тока по фазе происходит вследствие возникновения в цепи электродвижущей силы самоиндукции (силы F_m магнитного поля препятствуют изменению скорости движения электронов).

Для вывода формулы закона Ома воспользуемся равенством $U_m = E_{Lm}$, которое мы имеем право написать на основе предыдущих рассуждений (e_L должна быть равна по величине напряжению в любой момент времени). Установим, пользуясь формулой $E_{Lm} = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$, в какой зависимости находится максимальное значение электродвижущей силы самоиндукции от амплитуды тока I_m . В нашем случае коэффициент самоиндукции L — постоянная величина (поле создается в воздухе). Поэтому остается выяснить, от чего зависит наибольшая скорость изменения тока в момент, близкий к переходу тока через нулевое значение (рис. 108), т. е. при очень малом электрическом угле ωt , когда электродвижущая сила самоиндукции получается наибольшей.

Рассматривая Δi как мгновенное значение тока в момент времени Δt от начала координат, на основе общего выражения $i = I_m \sin \omega t$ можем написать

$$\Delta i = I_m \sin \omega \Delta t.$$

Вследствие малости угла $\omega \Delta t$ можно считать, что $\sin \omega \Delta t \approx \omega \Delta t$. Тогда $\Delta i = I_m \omega \Delta t$, откуда

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \omega I_m.$$

Как видим, наибольшая скорость изменения тока пропорциональна его амплитуде и угловой электрической скорости. Подставив значение $\frac{\Delta i}{\Delta t}$ в формулу $E_{Lm} = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$, получим

$$E_{Lm} = \omega L I_m,$$

или

$$U_m = \omega L I_m,$$

так как $E_{Lm} = U_m$.

Из последней формулы находим

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L},$$

или в действующих значениях (если поделить обе части равенства на $\sqrt{2}$)

$$I = \frac{U}{\omega L}. \quad (81)$$

Полученная формула и есть математическое выражение закона Ома для рассматриваемой цепи. Произведение ωL имеет размерность сопротивления, поэтому называется индуктивным сопротивлением. В теории переменного тока индуктивное сопротивление принято обозначать через X_L . При таком обозначении формула (81) принимает вид

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

а числовое значение индуктивного сопротивления определяется формулой

$$X_L = \omega L, \quad (82)$$

или

$$X_L = 2\pi f L. \quad (83)$$

Физически индуктивное сопротивление характеризует влияние электродвижущей силы самоиндукции на величину действующего значения тока в цепи. Как видно из формулы (83), индуктивное сопротивление прямо пропорционально частоте переменного тока f .

Для определения мощности, потребляемой цепью, построим ее линейную диаграмму, исходя из формулы $p = ui$. Мгновенные значения тока и напряжения, входящие в формулу, можно брать прямо по их линейным диаграммам с учетом принятого масштаба. Диаграмма мощности, построенная таким путем, изображена на рис. 109. Относительные значения мощности на диаграмме определяются знаками мгновенных значений тока и напряжения на отдельных участках периода, поэтому в первой и третьей четвертях периода мощность получается отрицательной, а во второй и четвертой — положительной.

Физически положительная и отрицательная мощности в течение периода означают, что электрическая энергия то поступает в цепь, то возвращается в источник, причем в равном количестве (все заштрихованные площадки, изображающие энергию, по величине одинаковы). В реальной цепи такого положения быть не может, потому что каждая реальная цепь обладает активным сопротивлением. В данной же теоретической цепи нет активного сопротивления, поэтому и энергия в ней не может расходоваться, а средняя мощность за период должна быть равна нулю.

Процессы, которые протекали бы в цепи, можно представить в таком виде.

Во второй четверти периода (рис. 109), несмотря на максимальное значение напряжения (чему соответствует наибольшая величина сил электрического поля источника), ток в цепи начинает только нарастать от нуля вследствие сильного противодействия электродвижущей силы самоиндукции (т. е. в результате действия сил магнитного поля, препятствующих изменению скорости движения электронов). В дальнейшем ток в цепи увеличивается, а напряжение источника расходуется на преодоление сил магнитного поля и превращается в энергию этого поля.

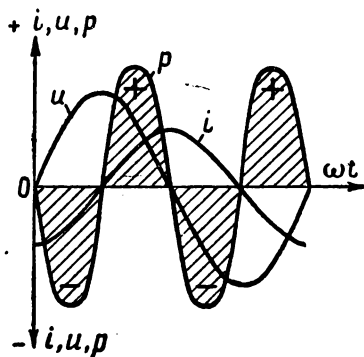


Рис. 109

Когда ток достигает наибольшей величины, напряжение изменяет свой знак. Физически это означает, что направление сил электрического поля в источнике изменилось на противоположное, вследствие чего силы поля начинают препятствовать движению электронов в цепи. Из-за такого действия сил электрического поля движение электронов в течение всей третьей четверти периода поддерживается силами магнитного поля, которые расходуют на это энергию, запасенную полем во второй четверти периода.

Энергия, расходуемая силами магнитного поля, по закону сохранения энергии возвращается в источник. Для простоты рассуждений можно считать, что в течение третьей четверти периода электроны движутся в цепи по инерции. Ток в цепи прекратится, когда энергия магнитного поля полностью израсходуется, т. е. возвратится в источник. В дальнейшем картина повторяется с той лишь разницей, что ток в цепи изменяет направление на противоположное.

Таким образом, рассматриваемая цепь из-за отсутствия

в ней активного сопротивления не может потреблять мощности тока, и это подтверждается формулой

$$P = I^2 R = 0.$$

Из формулы видно, что если $R = 0$, то и $P = 0$. Мощность, которая идет на создание магнитного поля и затем возвращается в источник, называется **реактивной** мощностью. Для данной цепи эта мощность определяется по формуле

$$P = UI.$$

В отличие от полезной мощности, т. е. мощности, потребляемой любой реальной электрической цепью, реактивная мощность измеряется в вольтамперах (*ва*). Один вольтампер равен одному вольту, умноженному на один ампер.

Выводы.

1. В цепи с одним только индуктивным сопротивлением ток отстает от напряжения на угол $\varphi = +90^\circ$. Ток, отстающий от напряжения на угол $\varphi = 90^\circ$, называется **реактивным** или **безваттным** током, так как он не расходует в цепи своей мощности.

2. Действующие значения переменных величин в цепи с индуктивным сопротивлением не подчиняются законам постоянного тока в обычной их форме.

3. Индуктивное сопротивление X_L учитывает влияние электродвижущей силы самоиндукции на величину действующего значения тока в цепи и находится в прямо пропорциональной зависимости от частоты тока.

§ 67. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЕМКОСТНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Цепь с одним только емкостным сопротивлением — третья и последняя теоретическая цепь. Близкое представление о такой цепи может дать цепь конденсатора, присоединенного к источнику очень короткими проводами. Активным и индуктивным сопротивлениями в этой цепи можно пренебречь.

Электрическая схема рассматриваемой цепи изображена на рис. 110. О цепи известны следующие данные:

- 1) цепь обладает только емкостью C , измеряемой в фарадах;
- 2) к зажимам цепи подведено синусоидальное переменное напряжение $u = U_m \sin \omega t$.

Необходимо:

- 1) построить линейные и векторные диаграммы для величины тока и напряжения;

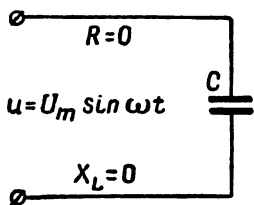


Рис. 110

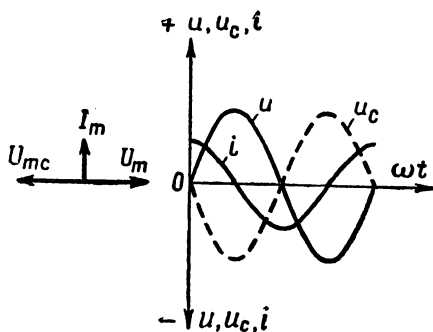


Рис. 111

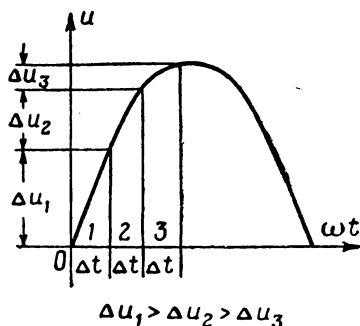


Рис. 112

2) получить формулы закона Ома и мощности для цепи.

Имея заданное приложенное к цепи напряжение, построим линейные и векторные диаграммы (рис. 111).

Известно (§ 29), что под действием приложенного напряжения в конденсаторе возникает собственное напряжение u_c , которое в любой момент времени равно приложенному напряжению u , но противоположно ему по знаку, так как токи (разрядные и зарядные), вызываемые этими напряжениями, имеют противоположные направления. Следовательно, собственное напряжение конденсатора (рис. 111) также должно изменяться по синусоидальному закону, но иметь угол сдвига фаз с приложенным напряжением в 180° .

Теперь определим угол сдвига фаз между током в цепи и приложенным напряжением. Для этого достаточно установить моменты перехода тока через нулевые и относительные значения с помощью уже известной нам формулы

$$i_c = C \frac{\Delta u}{\Delta t},$$

где C — емкость цепи в фарадах;

$\frac{\Delta u}{\Delta t}$ — скорость изменения приложенного напряжения в вольтах в секунду.

Из рис. 112 видно, что наименьшая (нулевая) скорость изменения синусоидального напряжения получается при переходе его через максимальные значения. Следовательно, в эти моменты и ток в цепи должен проходить через нулевые значения, а его линейная диаграмма должна пересекать ось времени.

Относительные значения тока легко установить по режимам заряда и разряда конденсатора. В первой четверти периода приложенное напряжение повышается, поэтому конденсатор заряжается и ток в цепи должен иметь одинаковое

направление с напряжением (иметь одинаковый знак с ним). Во второй четверти периода приложенное напряжение понижается и становится меньше собственного напряжения конденсатора, поэтому конденсатор разряжается, а ток в цепи получается противоположным приложенному напряжению. В дальнейшем картина повторяется. Зная моменты перехода тока через нулевые и относительные значения, можно построить его линейную диаграмму (рис. 111).

Из диаграммы видно, что ток опережает приложенное напряжение на угол $\varphi = -90^\circ$.

Для вывода формулы закона Ома установим, от чего зависит амплитуда тока в цепи при наибольшей скорости изменения приложенного напряжения, т. е. в моменты, близкие к переходу напряжения через нулевые значения (рис. 112). Воспользуемся формулой

$$I_m = C \frac{\Delta u}{\Delta t}.$$

Приняв Δu за мгновенное значение напряжения в момент времени Δt от начала координат, на основании формулы $u = U_m \sin \omega t$ можно написать

$$\Delta u = U_m \sin \omega \Delta t,$$

или

$$u = U_m \omega \Delta t,$$

так как $\sin \omega \Delta t = \omega \Delta t$ вследствие малости угла $\omega \Delta t$.

Из предпоследнего равенства находим

$$\frac{\Delta u}{\Delta t} = U_m \omega.$$

Подставив это значение $\frac{\Delta u}{\Delta t}$ в формулу $I_m = C \frac{\Delta u}{\Delta t}$, получим

$$I_m = \omega C U_m,$$

или в действующих значениях

$$I = \omega C U.$$

Последнюю формулу можно написать и так:

$$I = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}}. \quad (84)$$

В этом виде формула представляет собой математическое выражение закона Ома для цепи. Величина $\frac{1}{\omega C}$ имеет размерность сопротивления, поэтому называется емкостным сопротивлением и обозначается через X_C . При таком обозначении формула (84) принимает вид

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

а числовое значение сопротивления определяется формулой

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (85)$$

или

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}. \quad (86)$$

Физически емкостное сопротивление отражает влияние емкости цепи на величину действующего значения тока в ней.

В отличие от индуктивного сопротивления, емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте тока.

Для определения мощности, потребляемой цепью, построим линейную диаграмму мощности точно так же, как и для цепи с индуктивным сопротивлением, т. е. исходя из формулы $p = ui$ и используя линейные диаграммы тока и напряжения. Из диаграммы (рис. 113) видно, что и в данной цепи потребляемая мощность равна нулю из-за отсутствия в ней активного сопротивления. Положительные и отрицательные значения мощности означают, что электрическая энергия то поступает в цепь, то возвращается в источник в неизменном количестве.

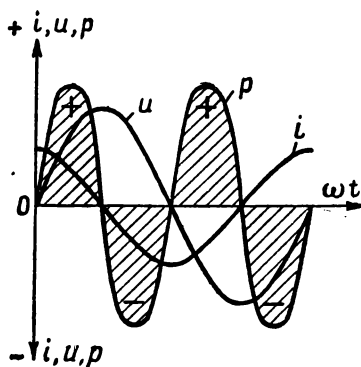


Рис. 113

Физические процессы, которые протекали бы в цепи при отсутствии в ней активного и индуктивного сопротивлений, можно представить следующим образом. В начале второй четверти периода (рис. 113) ток в цепи отсутствует, потому что напряжение, несмотря на его максимальное значение, в этот момент не изменяет своей величины $\frac{\Delta u}{\Delta t} = 0$, ток же в цепи определяется формулой $i = C \frac{\Delta u}{\Delta t}$. С уменьшением приложенного напряжения собственное напряжение конденсатора вызывает в цепи разрядный ток, который направлен противоположно приложенному напряжению.

Такое направление тока в течение второй четверти периода физически означает, что силы электрического поля, действующие в источнике, препятствуют движению электронов в цепи, поэтому само движение осуществляется под действием сил электрического поля конденсатора. Преодолевая действие сил электрического поля источника, эти силы расходуют энергию,

запасенную полем конденсатора в течение предыдущей четверти периода. По закону сохранения энергии энергия возвращается в генератор.

В конце второй четверти ток в цепи достигает наибольшей величины из-за непрерывного действия на электроны сил электрического поля конденсатора, а приложенное напряжение падает до нуля, что соответствует полному разряду источника и конденсатора.

В начале третьей четверти приложенное напряжение изменяет знак (источник изменяет направление электризации зажимов) и приобретает одинаковое направление с током. Вследствие изменения направления приложенного напряжения конденсатор начинает заряжаться, расходуя на это энергию источника. Ток в цепи прекращается, когда приложенное напряжение перестает изменяться (в конце третьей четверти, когда $\frac{\Delta u}{\Delta t} = 0$).

В дальнейшем процесс повторяется с той лишь разницей, что ток в цепи изменяет направление на противоположное.

Итак, в цепи с одной только емкостью также невозможно потребление электрической мощности вследствие отсутствия в этой цепи активного сопротивления, что подтверждается формулой

$$P = I^2 R.$$

Мощность, которая расходуется на создание электрического поля конденсатора и затем возвращается в источник, называется **реактивной** мощностью.

Для данной цепи эта мощность определяется формулой

$$P = UI$$

и измеряется в вольтамперах (*ва*).

Выводы.

1. В цепи с емкостным сопротивлением ток опережает напряжение на угол $\varphi = -90^\circ$. Ток, опережающий напряжение по фазе на 90° , называется реактивным или безваттным током, так как он не расходует в цепи своей мощности.

2. Действующие значения переменных величин в цепи с емкостным сопротивлением не подчиняются законам постоянного тока в обычной их форме.

3. Емкостное сопротивление учитывает влияние емкости на величину действующего значения тока в цепи и находится в обратно пропорциональной зависимости от частоты тока.

§ 68. МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Сложной цепью как для постоянного, так и для переменного токов называется такая цепь, в которой имеется хотя бы одно разветвление. Однако для переменного тока приходится

учитывать три сопротивления, отличных одно от другого по физическому смыслу. Поэтому для переменного тока сложной цепью условились называть всякую цепь, в которой имеется более одного из отмеченных в § 64 сопротивлений, независимо от того, как соединены между собой отдельные участки, обремененные этими сопротивлениями.

Неразветвленные участки сложных цепей, включающие в себя по одному из трех сопротивлений, будем называть простейшими участками. По отношению к этим участкам можно применять все выводы и формулы, полученные нами для трех теоретических цепей.

Исследовать сложные цепи переменного тока удобнее всего в таком порядке:

1. Выявить переменную величину (ток или напряжение), общую для всех или некоторых простейших участков, и построить ее векторную диаграмму (даже не в масштабе, если числовое значение величины сразу неизвестно).

2. Использовать полученные знания в отношении указанных участков и для них также построить векторные диаграммы (для тока или напряжения в зависимости от характера соединения участков между собой).

3. Пользуясь векторными диаграммами, произвести то или иное геометрическое действие (сложение, вычитание, разложение) над однородными электрическими величинами (над их векторами) и на основе полученных построений вывести необходимые формулы.

В дальнейшем при исследовании сложных цепей мы будем пользоваться исключительно векторными диаграммами, как более удобными для построения, причем векторами будем изображать действующие значения переменных величин. Такое использование векторных диаграмм приводит сразу к практически ценным результатам, т. е. дает возможность получать нужные электрические величины непосредственно в действующих значениях.

Если в неразветвленной электрической цепи имеется несколько различных (по физическому смыслу) сопротивлений, мы будем применять метод сосредоточенного распределения этих сопротивлений. Так, например, в реальной катушке приходится учитывать два сопротивления, активное и индуктивное, которые равномерно распределяются по всей длине катушки и одновременно преодолеваются проходящим через нее током. При таком распределении сопротивлений невозможно учесть их математически в формуле закона Ома. Поэтому условно считают, что оба сопротивления в цепи сосредоточены, т. е. на одном из участков цепи имеется только активное сопротивление, а на другом — только индуктивное, как это показано на рис. 114.

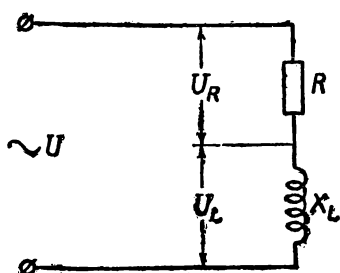


Рис. 114

Прибегая к такой условности, мы ничего не изменяем в распределении энергии, которую расходует источник для преодоления током сопротивлений в заданной цепи. Действительно, для преодоления каждого из сопротивлений единичные заряды расходуют часть своей энергии, получаемой от источника тока. Так как энергия, расходуемая каждым единичным зарядом во внешней

цепи, есть не что иное, как напряжение, подводимое к цепи, то можно считать, что это напряжение соответствующими частями (U_R и U_L на рис. 114) расходуется в двух последовательно соединенных участках цепи.

После таких предварительных замечаний перейдем к рассмотрению наиболее характерных сложных цепей переменного тока.

§ 69. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С РЕАЛЬНОЙ КАТУШКОЙ

Цепь переменного тока с активным и индуктивным сопротивлениями представляет интерес в том отношении, что в результате ее исследования можно получить общую формулу для определения мощности переменного тока. Кроме того, на этой цепи удобно показать метод исследования сложных цепей.

На практике цепь с индуктивным и активным сопротивлениями можно получить, включив под переменное напряжение обычную катушку из тонкой изолированной медной проволоки, имеющую значительное число витков.

Емкость в цепи, образуемой катушкой, настолько незначительна, что ею обычно пренебрегают. Эта емкость создается проводами, питающими катушку, и соседними витками катушки (межвитковая емкость), поскольку эти витки изолированы один от другого и находятся под некоторой разностью потенциалов.

Электрическая схема цепи изображена на рис. 114. Об этой цепи известны следующие данные:

- 1) активное сопротивление R цепи, измеряемое в омах;
- 2) индуктивное сопротивление $X_L = 2\pi fL$ цепи в омах;
- 3) действующее значение напряжения U , приложенного к зажимам цепи.

Необходимо:

- 1) построить векторные диаграммы для величин тока и напряжения;
- 2) получить формулы закона Ома и мощности для цепи.

Рассматриваемую цепь, как уже говорилось, можно считать состоящей из двух последовательно соединённых простейших участков — один с активным, а другой с индуктивным сопротивлением.

Общей величиной для обоих участков цепи в данном случае является величина тока I , так как при последовательном соединении приемников величина тока в цепи везде одинакова.

Построим векторную диаграмму для действующего значения тока (рис. 115) пока не в масштабе, так как числовое значение тока нам еще неизвестно.

При прохождении тока на каждом из участков расходуется часть приложенного напряжения, пропорциональная величине сопротивления участка. Расходуемое током напряжение на участке с активным сопротивлением называют активным или омическим падением напряжения U_R , а на участке с индуктивным сопротивлением — индуктивным падением напряжения U_L . Исходя из особенностей теоретических цепей, мы можем утверждать, что активное падение напряжения должно совпадать по фазе с током, а индуктивное — опережать его на угол φ , равный $+90^\circ$. Числовые значения падений напряжения определяются формулами

$$U_R = IR$$

и

$$U_L = IX_L.$$

Построим векторные диаграммы активного и индуктивного падений напряжения (рис. 115).

Электродвижущая сила самоиндукции E_L , возникающая в цепи под действием переменного магнитного поля, численно равна индуктивному падению напряжения и сдвинута относительно него по фазе на угол в 180° (рис. 115). Складывая геометрически векторы активного и индуктивного падений напряжения, получаем вектор приложенного к цепи напряжения U . Одновременно устанавливаем, что ток в цепи отстает от напряжения на некоторый угол φ , меньший $+90^\circ$. Приемники электрической энергии, имеющие положительный угол сдвига фаз между током и напряжением менее 90° , называются **индуктивной нагрузкой** для генератора.

Прямоугольный треугольник abc , получаемый при сложении векторов (рис. 115), называется треугольником напряжений для данной цепи. Пользуясь этим треугольником, можно вывести формулу закона Ома для цепи.

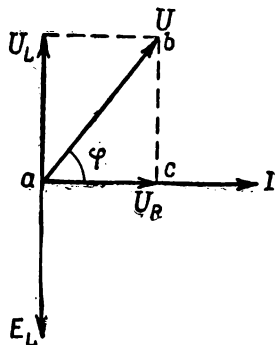


Рис. 115

Числовое значение приложенного к цепи напряжения из треугольника abc определяется теоремой Пифагора

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{I^2 (R^2 + X_L^2)} = I \sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

Отсюда величина тока в цепи

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}. \quad (87)$$

Эта формула и является математическим выражением закона Ома для цепи. Величина $\sqrt{R^2 + X_L^2}$, входящая в знаменатель формулы, называется полным сопротивлением цепи. В теории переменного тока полное сопротивление принято обозначать буквой Z . При таком обозначении формула (87) принимает вид

$$I = \frac{U}{Z}, \quad (88)$$

а числовое значение полного сопротивления определяется из выражения

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}. \quad (89)$$

Для определения мощности, потребляемой цепью, поступаем следующим образом. Умножаем все стороны треугольника напряжений на величину тока. Тогда тот же самый треугольник в соответствующем масштабе дает целых три мощности для цепи (рис. 116):

- 1) полную, или кажущуюся, мощность цепи $P_k = UI$ *ва* (пропорциональную гипотенузе треугольника);
- 2) реактивную мощность $P_p = U_L I$ *ва* (пропорциональную катету, лежащему против угла φ);
- 3) потребляемую цепью мощность $P = U_R I$ *вт* (пропорциональную катету, прилежащему к углу φ).

Реактивная мощность, как мы уже знаем, — это та мощность, которая то поступает в цепь для создания магнитного поля (при нарастании тока), то возвращается в источник (при уменьшении тока). Из треугольника мощностей величина реактивной мощности определяется формулой

$$P_p = UI \sin \varphi.$$

Полная, или кажущаяся, мощность, как и реактивная мощность, измеряется в вольтамперах. Мощность называется кажущейся, так как она численно всегда больше мощности, фактически потребляемой цепью, из-за наличия реактивной мощности.

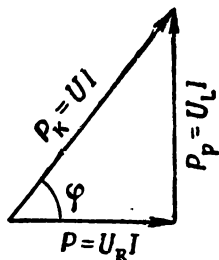


Рис. 116

Из треугольника мощностей можно определить и потребляемую цепью мощность

$$P = UI \cos \varphi. \quad (90)$$

Полученное выражение представляет собой общую формулу, справедливую для вычисления мощности в любой цепи переменного тока. Множитель $\cos \varphi$, входящий в формулу, называется **коэффициентом мощности**. Он показывает, какая часть полной, или кажущейся, мощности фактически потребляется цепью.

Величина $\cos \varphi$ может быть определена из треугольника сопротивлений. Такой треугольник легко получить из треугольника напряжений, если все его стороны разделить на величину тока (рис. 117, а). Из треугольника сопротивлений находим

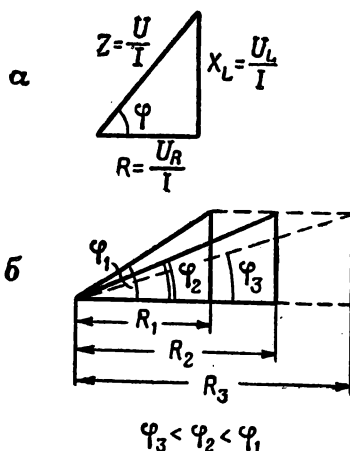


Рис. 117

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}. \quad (91)$$

Как видим, $\cos \varphi$ зависит от соотношения между сопротивлениями в цепи.

Построения, сделанные на рис. 117, б, показывают, что с увеличением в цепи активного сопротивления (при неизменной величине индуктивного сопротивления X_L) $\cos \varphi$ также увеличивается. Физически это означает, что с ростом активного сопротивления все большая часть кажущейся мощности UI начинает потребляться цепью в результате преодоления этого сопротивления движущимися электронами.

Проверим справедливость формулы $P = UI \cos \varphi$ в отношении теоретических цепей, рассмотренных нами. В цепи с активным сопротивлением угол сдвига фаз между током и напряжением равен нулю, поэтому формула мощности принимает вид $P = UI$ (так как $\cos 0^\circ = 1$), что и было получено нами при исследовании цепи.

В двух других теоретических цепях угол сдвига фаз между током и напряжением составляет 90° , поэтому мощность в цепях согласно формуле $P = UI \cos \varphi$ получается равной нулю (так как $\cos 90^\circ = 0$), что также было установлено нами при исследовании этих цепей.

Справедливость формулы для теоретических цепей дает возможность применять ее и для реальных цепей, потому что каждая такая цепь состоит из простейших участков, являющихся фактически теоретическими цепями. В дальнейшем мы и будем пользоваться формулой $P = UI \cos \varphi$ для вычисления мощности, потребляемой любой цепью переменного тока.

В заключение рассмотрим, каким образом можно вычислить величину активного сопротивления реальной катушки.

При постоянном токе сопротивление приемника легко определить способом вольтметра и амперметра, т. е. по показаниям приборов и на основе следствия из закона Ома $I = \frac{U}{R}$, откуда

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

В отношении переменного тока этот способ отпадает, так как в полученную нами формулу $I = \frac{U}{Z}$ входит полное сопротивление $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$, включающее в себя не только активное, но и индуктивное сопротивление цепи. Для определения величины активного сопротивления приходится поэтому исходить из формулы мощности, потребляемой цепью, поскольку эта мощность зависит исключительно от величины активного сопротивления в цепи. Преобразовав несколько формулу мощности $P = UI \cos \varphi$ (подставив в нее значение $\cos \varphi$), получим

$$P = I \frac{U}{Z} R = I^2 R.$$

Отсюда найдем величину активного сопротивления

$$R = \frac{P}{I^2}. \quad (92)$$

Таким образом, для определения величины активного сопротивления катушки необходимо измерить мощность, потребляемую катушкой, и величину тока в ней. Мощность, потребляемая цепью, измеряется ваттметром.

Выводы.

1. При наличии в цепи активного и индуктивного сопротивлений, включенных последовательно, положительный угол сдвига фаз между током и напряжением получается меньше 90° .

2. Мощность, потребляемая цепью, определяется общей формулой $P = UI \cos \varphi$.

3. Величина коэффициента мощности цепи определяется исключительно соотношением ее сопротивлений.

§ 70. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ИЗ НЕСКОЛЬКИХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ КАТУШЕК

Последовательное соединение нескольких катушек нередко встречается на практике в специальных электрических схемах. Рассмотрение цепи с таким соединением катушек, во-первых, знакомит с необходимыми расчетными формулами, а во-вторых, дает понятие об эквивалентной индуктивности цепи и о способе ее вычисления.

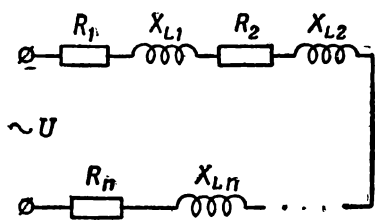


Рис. 118

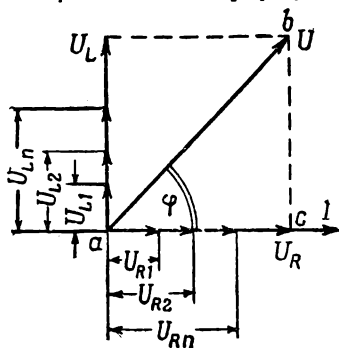


Рис. 119

Схема цепи изображена на рис. 118.

Известны следующие данные о цепи:

1) R_1, R_2, \dots, R_n и $X_{L1}, X_{L2}, \dots, X_{Ln}$ — соответственно активные и индуктивные сопротивления катушек в омах (число катушек может быть любое);

2) U — действующее значение напряжения, приложенного к цепи.

Необходимо:

1) построить векторные диаграммы для величин тока и напряжения;

2) получить формулы закона Ома и мощности для цепи;

3) определить величину эквивалентной индуктивности в цепи.

Общей величиной для простейших участков, образующих такую цепь, является величина тока I . Построим векторную диаграмму тока (рис. 119).

Проходя по участкам цепи, ток вызывает на них падения напряжения: активные $U_{R1} = IR_1, U_{R2} = IR_2, \dots, U_{Rn} = IR_n$, совпадающие по фазе с током, и индуктивные $U_{L1} = IX_{L1}, U_{L2} = IX_{L2}, \dots, U_{Ln} = IX_{Ln}$, опережающие ток на угол $\varphi = +90^\circ$.

Построим векторные диаграммы этих падений напряжения (рис. 119).

Сложив геометрически одноименные падения напряже-

ния, получим суммарное активное падение напряжения в цепи

$$\bar{U}_R = \bar{U}_{R1} + \bar{U}_{R2} + \dots + \bar{U}_{Rn}$$

и суммарное индуктивное падение напряжения

$$\bar{U}_L = \bar{U}_{L1} + \bar{U}_{L2} + \dots + \bar{U}_{Ln}.$$

(В целях уменьшения размеров чертежа на рис. 119 векторы \bar{U}_R и \bar{U}_L условно показаны по величине, меньше чем геометрическая сумма векторов, которые их составляют.)

В данном случае геометрическая сумма векторов \bar{U}_{R1} , \bar{U}_{R2} , ..., \bar{U}_{Rn} , а также векторов \bar{U}_{L1} , \bar{U}_{L2} , ..., \bar{U}_{Ln} равна их арифметической сумме, так как все векторы одноименных падений напряжения совпадают по направлению.

Сложив векторы \bar{U}_R и \bar{U}_L , получим вектор \bar{U} приложенного к цепи напряжения (рис. 119).

Из треугольника напряжений abc находим

$$\begin{aligned} U &= \sqrt{\bar{U}_R^2 + \bar{U}_L^2} = \\ &= \sqrt{I^2 (R_1 + R_2 + \dots + R_n)^2 + I^2 (X_{L1} + X_{L2} + \dots + X_{Ln})^2} = \\ &= I \sqrt{(R_1 + R_2 + \dots + R_n)^2 + (X_{L1} + X_{L2} + \dots + X_{Ln})^2}. \end{aligned}$$

Отсюда

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_2 + \dots + R_n)^2 + (X_{L1} + X_{L2} + \dots + X_{Ln})^2}}, \quad (93)$$

или

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

где $Z = \sqrt{(R_1 + R_2 + \dots + R_n)^2 + (X_{L1} + X_{L2} + \dots + X_{Ln})^2}$ —

полное сопротивление цепи.

Формула (93) является математическим выражением закона Ома для рассматриваемой цепи.

Из треугольника напряжений можно получить треугольники мощностей и сопротивлений для цепи и по этим треугольникам найти необходимые формулы

$$\begin{aligned} P &= UI \cos \varphi, \\ \cos \varphi &= \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{Z}. \end{aligned}$$

Теперь выясним, что следует понимать под эквивалентной индуктивностью цепи и как эту индуктивность вычислить. Для этого обратимся к формуле

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2 + \dots + R_n)^2 + (X_{L1} + X_{L2} + \dots + X_{Ln})^2},$$

определяющей величину полного сопротивления цепи. В этой формуле сумма индуктивных сопротивлений представляет собой не что иное, как эквивалентное индуктивное сопротивление цепи $X_{L_{\text{эк}}}$, т. е. такое сопротивление, которое, будучи включено в цепь вместо всех данных индуктивных сопротивлений, не изменяет тока в цепи и величины $\cos \varphi$. Следовательно, эквивалентное сопротивление

$$X_{L_{\text{эк}}} = X_{L_1} + X_{L_2} + \dots + X_{L_n}.$$

Подставив в эту формулу значения индуктивных сопротивлений $X_{L_1} = \omega L_1$, $X_{L_2} = \omega L_2$, ..., $X_{L_n} = \omega L_n$ и аналогично $X_{L_{\text{эк}}} = \omega L_{\text{эк}}$, получим

$$\omega L_{\text{эк}} = \omega (L_1 + L_2 + \dots + L_n),$$

или после сокращения на ω

$$L_{\text{эк}} = L_1 + L_2 + \dots + L_n. \quad (94)$$

В данной формуле величина $L_{\text{эк}}$ и представляет собой **эквивалентную индуктивность цепи**, т. е. такую индуктивность (или такой коэффициент самоиндукции), которая, будучи введена в цепь вместо всех данных индуктивностей катушек, не изменяет тока в цепи и величины $\cos \varphi$.

Как видим, при последовательном соединении катушек эквивалентная индуктивность цепи равна сумме индуктивностей отдельных катушек. Физически это означает, что благодаря последовательному соединению катушек их электродвижущие силы самоиндукции складываются, увеличивая этим влияние на величину действующего значения тока в цепи (чем больше $L_{\text{эк}}$, тем больше и индуктивное сопротивление $X_{L_{\text{эк}}} = \omega L_{\text{эк}}$, уменьшающее ток в цепи).

Выводы.

1. В цепи с несколькими последовательно соединенными катушками величина тока и мощность определяются по формулам, аналогичным формулам для цепи с одной катушкой (предварительно складываются отдельно активные и индуктивные сопротивления катушек).

2. Эквивалентная индуктивность в цепи равна сумме индуктивностей отдельных катушек.

§ 71. ПРОХОЖДЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ЧЕРЕЗ КАТУШКУ С ЖЕЛЕЗНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Опыт показывает, что если в катушку, питаемую переменным током, ввести железный сердечник, то действующее значение тока в цепи резко уменьшится, а железный сердечник станет нагреваться и, следовательно, потреблять дополнительную энергию от источника, к которому присоединена катушка.

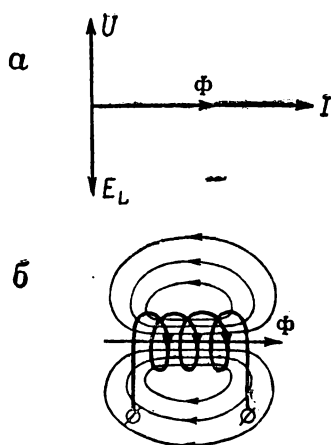


Рис. 120

Эти особенности, связанные с прохождением переменного тока через катушку с железным сердечником, интересны в том отношении, что они характерны и для трансформаторов, чем собственно и вызывается необходимость их рассмотрения.

Ознакомимся предварительно с зависимостями, существующими между любой синусоидальной электродвижущей силой, возникающей в контуре, и магнитным потоком, сцепленным с этим контуром.

Эти зависимости заключаются в следующем.

Во-первых, для получения в контуре синусоидальной электродвижущей силы необходимо, чтобы магнитный поток, сцепленный с контуром, также изменялся синусоидально. Во-вторых, между электродвижущей силой и магнитным потоком всегда существует угол сдвига фаз в 90° . В-третьих, действующее значение электродвижущей силы определяется формулой

$$E = 4,44 f W \Phi_m,$$

где Φ_m — максимальный магнитный поток, сцепленный с витками контура, в вольт-секундах;

W — число витков контура;

f — частота тока в герцах.

Синусоидальное изменение магнитного потока, сцепленного с контуром, а также наличие угла сдвига фаз между этим потоком и электродвижущей силой удобнее всего показать на цепи с чисто индуктивным сопротивлением. Векторная диаграмма для этой цепи изображена на рис. 120, а. Электродвижущая сила самоиндукции E_L , возникающая в цепи, изменяется по синусоидальному закону (§ 66).

При отсутствии в катушке железного сердечника магнитный поток, сцепленный с ее витками (рис. 120, б), пропорционален величине тока, что подтверждается формулой

$\Phi = \frac{4\pi WS}{l} \cdot 10^{-7} I$ (§ 49). Подставив в эту формулу вместо тока I мгновенное значение переменного тока в общем виде ($I_m \sin \omega t$), для мгновенных значений магнитного потока, сцепленного с витками катушки, получим

$$\Phi = \frac{4\pi WS}{l} \cdot 10^{-7} I_m \sin \omega t,$$

или

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t,$$

так как $\frac{4\pi WS}{l} \cdot 10^{-7} I_m = \Phi_m$ представляет собой максимальный магнитный поток, сцепленный с катушкой при максимальном токе в ней.

Таким образом, при синусоидальном изменении электродвижущей силы самоиндукции, возникающей в катушке, магнитный поток, сцепленный с этой катушкой и пересекающий ее витки, действительно, изменяется по синусоидальному закону. Вследствие синусоидального изменения магнитного потока к нему применимы векторные диаграммы, позволяющие определять его мгновенные значения. Мгновенные магнитные потоки, сцепленные с катушкой, также можно изображать векторами как величины, имеющие в отдельные моменты времени вполне определенное направление в пространстве. На чертежах вектор магнитного потока необходимо располагать так, чтобы он совпадал с геометрической осью катушки и имел одинаковое направление с магнитными силовыми линиями (рис. 120, б).

Сравнив выражения $i = I_m \sin \omega t$ и $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, видим, что ток и создаваемый им магнитный поток совпадают по фазе (рис. 120, а). Вследствие этого электродвижущая сила самоиндукции оказывается сдвинутой относительно потока на 90° (в сторону отставания).

Синусоидальное изменение магнитного потока, сцепленного с контуром, и наличие угла сдвига фаз в 90° между потоком и электродвижущей силой характерны и для способа индукции, применяемого в генераторе переменного тока. На рис. 121, а ротор генератора изображен в положении, когда

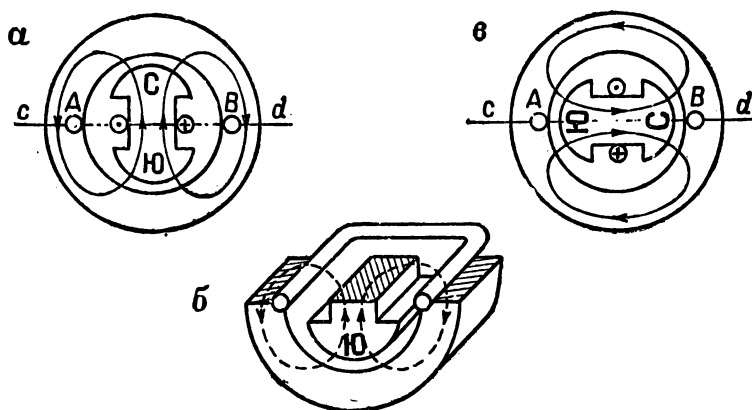


Рис. 121

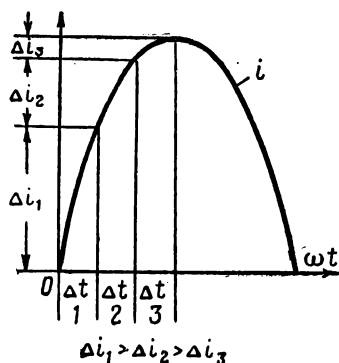


Рис. 122

его магнитный поток полностью сцеплен с витком AB , укрепленным в пазах статора, и, следовательно, максимален по величине; однако электродвижущая сила индукции в витке при этом положении ротора равна нулю, так как стороны витка не пересекаются магнитными силовыми линиями потока (для большей наглядности генератор на рис. 121, б показан в разрезе).

После поворота ротора на 90° (рис. 121, в) магнитный поток, сцепленный с витком, становится равным нулю, а электродвижущая сила, наоборот, получает максимальное значение, потому что в этом положении ротора стороны витка AB пересекаются наибольшим количеством магнитных силовых линий потока. Как видим, электродвижущая сила и создающий ее магнитный поток, действительно сдвинуты по фазе на угол в 90° .

Пользуясь рис. 121, а, нетрудно убедиться также в том, что вследствие синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре генератора при повороте ротора из положения, указанного на рисунке, магнитный поток, сцепленный с витком, изменяется синусоидально (сначала из сцепления с витком выходит немного силовых линий, а затем все больше и больше).

Для установления числовой зависимости между действующим значением индуцированной электродвижущей силы и наибольшим значением магнитного потока, сцепленного с контуром, воспользуемся формулой

$$e = - W \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Исходя из этой формулы, для максимального значения электродвижущей силы самоиндукции, возникающей в катушке, можем написать

$$E_{Lm} = W \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Равенство означает, что максимальная электродвижущая сила самоиндукции возникает в катушке при наибольшей скорости изменения магнитного потока, сцепленного с катушкой. Из построений, сделанных на рис. 122, видно, что такая скорость $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ при синусоидальном изменении магнитного потока

получается в моменты, близкие к переходу потока через нулевые значения, т. е. при очень малых углах ωt .

Приняв $\Delta\Phi$ за мгновенное значение магнитного потока, сцепленного с катушкой, для момента времени Δt от начала координат на основе общего выражения $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ можно написать

$$\Delta\Phi = \Phi_m \sin \omega \Delta t,$$

или

$$\Delta\Phi = \Phi_m \omega \Delta t$$

(вследствие малости угла $\omega \Delta t$). Отсюда

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \omega \Phi_m.$$

Подставив значение $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ в равенство $E_{Lm} = W \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, получим

$$E_{Lm} = \omega W \Phi_m = 2\pi f W \Phi_m,$$

или в действующем значении (разделив обе части на $\sqrt{2}$)

$$E_L = 4,44 f W \Phi_m. \quad (95)$$

Теперь выясним, почему происходят отмеченные нами в начале параграфа изменения в цепи катушки при введении в нее железного сердечника.

При наличии в катушке железного сердечника коэффициент самоиндукции катушки

$$L = k \frac{4\pi W^2 S \mu_{ж}}{l} \cdot 10^{-7}$$

не остается постоянным по величине в течение периода вследствие изменения магнитной проницаемости железа ($\mu_{ж}$), а его среднее значение во много раз превышает коэффициент самоиндукции той же катушки, но без железного сердечника (см. § 49).

Из-за увеличения коэффициента самоиндукции катушки увеличивается ее индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$, которое и приводит к уменьшению тока в цепи, как это следует из формулы

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}.$$

Увеличение индуктивного сопротивления физически означает увеличение электродвижущей силы самоиндукции, которая начинает оказывать более сильное влияние на величину действующего значения тока в цепи.

Нагрев железного сердечника в катушке происходит от действия паразитных токов, возникающих в железном сердеч-

нике, а также вследствие перемагничивания сердечника (потери на гистерезис). Ввиду дополнительного расхода энергии источника тока на нагревание железного сердечника формула для определения полной мощности, потребляемой катушкой, принимает вид

$$P_0 = P_{\text{ж}} + I^2 R,$$

где $P_{\text{ж}}$ — общая мощность, расходуемая на нагрев железного сердечника (под действием паразитных токов и из-за гистерезиса);

$I^2 R$ — мощность, расходуемая в активном сопротивлении катушки.

Из этой формулы определим активное сопротивление катушки

$$R = \frac{P_0 - P_{\text{ж}}}{I^2}. \quad (96)$$

Как видим, для вычисления величины активного сопротивления катушки с железным сердечником нужно знать не только величину тока в цепи и полную мощность, потребляемую катушкой, но и мощность $P_{\text{ж}}$, расходуемую источником на нагрев железного сердечника. При расчете катушек эта мощность вычисляется по эмпирическим (т. е. получаемым опытным путем) формулам.

Кроме отмеченных особенностей, в катушке наблюдается еще одна особенность, вызываемая явлением гистерезиса. Она заключается в том, что магнитный поток катушки не совпадает по фазе с током, а отстает от него на небольшой угол δ , поэтому векторная диаграмма для катушки с железным сердечником имеет вид, показанный на рис. 123.

На этой диаграмме U — напряжение, приложенное к катушке, $U_L = -E_L$ и IR — составляющие напряжения, которые расходуются соответственно на преодоление электродвижущей силы самоиндукции E_L катушки и ее активного сопротивления R , I — величина тока в катушке, δ — угол сдвига фаз между током и магнитным потоком Φ , называемый углом потерь в катушке. Вследствие наличия этого угла треугольник напряжений (abc) для катушки уже не получается прямоугольным (угол при вершине c — тупой), поэтому формула

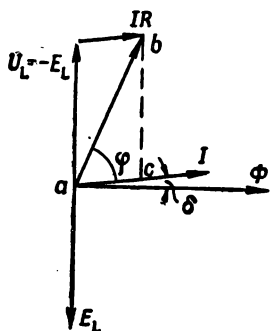


Рис. 123

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

для определения тока в цепи катушки дает не совсем точный результат,

Катушки с железным сердечником, называемые иначе дроссельными катушками (рис. 124), часто применяются на практике в цепях переменного тока главным образом для поглощения излишнего напряжения вместо обычных реостатов. Потеря мощности в дроссельной катушке примерно в десять раз меньше, чем в реостате. Объясняется это небольшой величиной активного сопротивления катушки по сравнению с активным сопротивлением реостата (у реостата $Z=R$, а у катушки $Z=\sqrt{R^2+X_L^2}$, однако в обоих случаях для поглощения излишнего напряжения U произведение $IZ=U$ должно быть одинаковым).

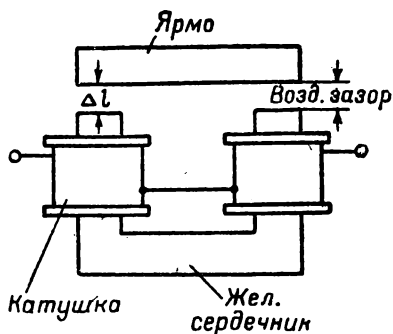


Рис. 124

Дроссельная катушка, включенная в цепь последовательно с каким-либо приемником (лампой, например), дает очень плавную регулировку тока при изменении воздушного зазора Δl между сердечником и ярмом катушки. Увеличение зазора уменьшает индуктивное сопротивление катушки (так как уменьшается L), поэтому ток в цепи возрастает. Уменьшение зазора дает обратный результат.

Большое применение дроссельная катушка находит в радиотехнике. Здесь она используется в качестве фильтра, практически не пропускающего токи высокой частоты на тех или иных участках электрической цепи.

§ 72. ЦЕПЬ ИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ АКТИВНОГО И ЕМКОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ

Последовательное соединение конденсатора и активного сопротивления (в виде проволочного или непроволочного сопротивления) довольно часто встречается в электрических схемах радиотехнических устройств. Индуктивным сопротивлением, возникающим в цепи при таком соединении, пренебрегают из-за его незначительности, так что цепь, изображенную на рис. 125, вполне можно рассматривать как реальную цепь.

Известны следующие данные о цепи:

- 1) R — активное сопротивление;
- 2) $X_C = \frac{1}{\omega C}$ — емкостное сопротивление конденсатора;

3) U — действующее значение напряжения, приложенного к цепи.

Необходимо:

1) построить векторные диаграммы для величины тока и напряжения в цепи;

2) получить формулы закона Ома и мощности.

Исследование данной цепи аналогично исследованию цепи с реальной катушкой, поэтому его можно провести менее подробно.

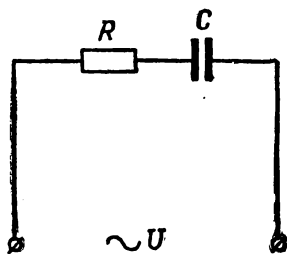


Рис. 125

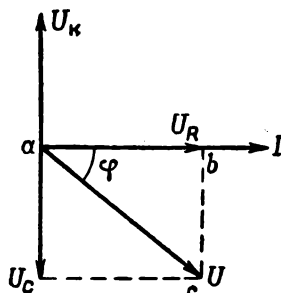


Рис. 126

Общей величиной для двух простейших последовательно соединенных участков цепи является величина тока I , показанного на векторной диаграмме (рис. 126). Проходя по участкам, ток расходует на них приложенное напряжение в виде активного падения напряжения $U_R = IR$ и емкостного падения напряжения $U_C = IX_C$, которое уравнивает собой в любой момент времени собственное напряжение конденсатора U_K , возникающее на его пластинах. Зная, что активное падение напряжения совпадает по фазе с током, а емкостное отстает от него на угол $\varphi = -90^\circ$, построим векторные диаграммы этих падений напряжения, а также собственного напряжения конденсатора (рис. 126). Сложив векторы \bar{U}_R и \bar{U}_C , найдем вектор приложенного к цепи напряжения U .

Из построений видно, что вследствие наличия в цепи активного сопротивления ток опережает напряжение на угол $\varphi < 90^\circ$. Прямоугольный треугольник abc является треугольником напряжений. Из треугольника можно определить числовое значение приложенного к цепи напряжения:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}.$$

Подставив в эту формулу значения $U_R = IR$ и $U_C = IX_C$, получим

$$U = I\sqrt{R^2 + X_C^2}.$$

Отсюда ток в цепи

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}, \quad (97)$$

или

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

где $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$ — полное сопротивление в цепи.

Формула (97) представляет собой математическое выражение закона Ома для данной цепи.

Точно так же, как и для цепи с реальной катушкой, из треугольника напряжений можно получить треугольники мощностей и сопротивлений, а на основе этих треугольников вывести формулы для мощности и $\cos \varphi$:

$$P = UI \cos \varphi$$

и

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}.$$

При наличии в цепи нескольких последовательно соединенных конденсаторов и активных сопротивлений (рис. 127) ее исследование проводится так же, как исследование цепи из

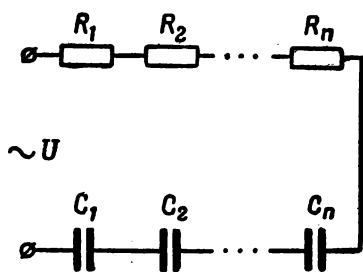


Рис. 127

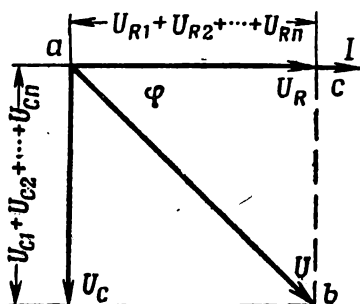


Рис. 128

нескольких последовательно соединенных катушек (§ 70). Сначала находят суммарное активное U_R и суммарное емкостное U_C падения напряжения как арифметические суммы $U_{R1}, U_{R2}, \dots, U_{Rn}$ и $U_{C1}, U_{C2}, \dots, U_{Cn}$. После этого складывают их геометрически (рис. 128) и по полученному треугольнику напряжений выводят формулу закона Ома

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_2 + \dots + R_n)^2 + (X_{C1} + X_{C2} + \dots + X_{Cn})^2}},$$

а также формулы для мощности и $\cos \varphi$

$$P = UI \cos \varphi$$

и

$$\cos \varphi = \frac{\Sigma R}{Z},$$

где

$$\Sigma R = R_1 + R_2 + \dots + R_n,$$

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2 + \dots + R_n)^2 + (X_{C1} + X_{C2} + \dots + X_{Cn})^2}.$$

Выводы.

1. В цепи из последовательно соединенных конденсатора и активного сопротивления ток опережает напряжение на угол $\varphi < 90^\circ$. Такие приемники называются емкостной нагрузкой для генератора переменного тока.

2. Мощность, потребляемая цепью, определяется общей формулой $P = UI \cos \varphi$.

3. Величина коэффициента мощности $\cos \varphi$ цепи определяется исключительно соотношением ее сопротивлений.

§ 73. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ КАТУШЕК

Рассмотрение данной цепи позволяет получить формулу для определения эквивалентной индуктивности при параллельном соединении катушек и, кроме того, знакомит с порядком исследования сложных цепей, включающих параллельное соединение приемников.

Электрическая схема цепи изображена на рис. 129. Известны следующие данные о цепи:

1) R_1, R_2, \dots, R_n и $X_{L1}, X_{L2}, \dots, X_{Ln}$ — соответственно активные и индуктивные сопротивления катушек;

2) U — действующее значение приложенного напряжения в цепи.

Необходимо:

1) построить векторные диаграммы для цепи;

2) получить формулы для общей величины тока и мощности, потребляемой цепью;

3) вывести формулу для определения эквивалентной индуктивности цепи.

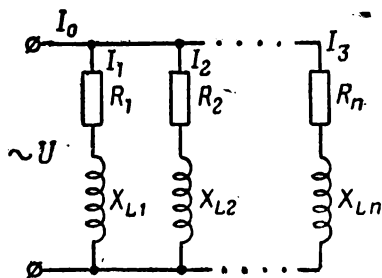


Рис. 129

При параллельном соединении катушек общей величиной для них является напряжение, приложенное к цепи. Построим его векторную диаграмму (рис. 130). Токи в отдельных катушках, а также углы сдвига

фаз между этими токами и приложенным напряжением могут быть определены по формулам

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}}; \quad I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + X_{L2}^2}}; \dots; \quad I_n = \frac{U}{\sqrt{R_n^2 + X_{Ln}^2}}$$

и

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1}; \quad \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}; \dots; \quad \cos \varphi_n = \frac{R_n}{Z_n}$$

(по косинусам можно найти углы).

Построим векторные диаграммы токов катушек.

Для определения общего тока при параллельном соединении приемников невозможно получить формулу закона Ома с помощью средней математики. Поэтому дальнейшее исследование рассматриваемой цепи будем проводить либо графическим методом, либо математическим, разлагая при этом токи катушек на активные и реактивные составляющие.

При графическом методе общий ток I_0 находят путем геометрического сложения векторов токов отдельных катушек по правилу многоугольника (рис. 130). При этом векторы токов катушек должны быть изображены в масштабе, а углы сдвига фаз ($\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$) отложены как можно точнее (при практическом решении задач подобного типа). Полученный вектор общего тока определяет собой и угол его сдвига фаз φ_0 относительно приложенного напряжения, что дает возможность найти $\cos \varphi_0$ (по таблицам), а следовательно, и общую мощность, потребляемую цепью, по формуле $P_0 = UI_0 \cos \varphi_0$.

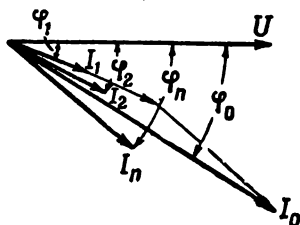


Рис. 130

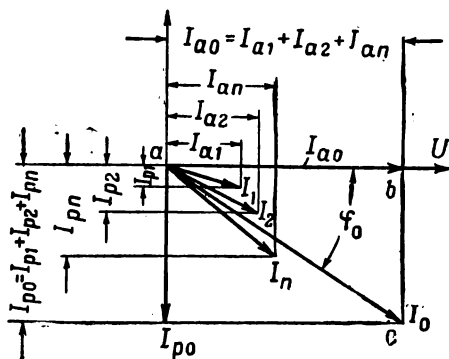


Рис. 131

При математическом способе ток каждой катушки разлагают на две взаимно перпендикулярные составляющие — активную $I_a = I \cos \varphi$, совпадающую по фазе с напряжением, и реактивную $I_p = I \sin \varphi$ (рис. 131), отстающую от напряжения на угол $\varphi = +90^\circ$. После этого складывают арифметически отдельно активные и реактивные составляющие (как совпа-

дающие по направлению) и получают составляющие общего тока: активную $I_{a0} = I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2 + \dots + I_n \cos \varphi_n$ и реактивную $I_{p0} = I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2 + \dots + I_n \sin \varphi_n$. Сложив геометрически эти составляющие, получают вектор общего тока I_0 .

Из треугольника токов abc числовое значение тока определяется формулой

$$I_0 = \sqrt{I_{a0}^2 + I_{p0}^2} = \sqrt{(I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2 + \dots + I_n \cos \varphi_n)^2 + (I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2 + \dots + I_n \sin \varphi_n)^2}. \quad (98)$$

Из того же треугольника величина общего $\cos \varphi$

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{a0}}{I_0}.$$

Зная общую величину тока и общий $\cos \varphi$, можно определить и общую мощность, потребляемую цепью:

$$P = UI_0 \cos \varphi_0.$$

Для вывода формулы эквивалентной индуктивности пренебрежем активным сопротивлением катушек (иначе формулу невозможно получить с помощью средней математики). Такое допущение вполне возможно при больших частотах переменного тока, когда индуктивное сопротивление $X_L = 2\pi fL$ значительно больше активного. При таком допущении можно считать, что все токи катушек отстают от напряжения на 90° и, следовательно, совпадают по фазе (рис. 132). Поэтому для определения общего тока I_0 можно взять просто арифметическую сумму токов катушек

$$I_0 = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Подставив в это равенство значения токов катушек $I_1 = \frac{U}{\omega L_1}$, $I_2 = \frac{U}{\omega L_2}$, ..., $I_n = \frac{U}{\omega L_n}$ и значение общего тока $I_0 = \frac{U}{\omega L_{\text{эк}}}$, где $L_{\text{эк}}$ — эквивалентная индуктивность цепи, получим

$$\frac{U}{\omega L_{\text{эк}}} = \frac{U}{\omega L_1} + \frac{U}{\omega L_2} + \dots + \frac{U}{\omega L_n},$$

или после сокращения на ω и U

$$\frac{1}{L_{\text{эк}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}.$$

Как видим, полученная нами формула аналогична формуле $\frac{1}{R_{\text{эк}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ для определения эквивалентного

сопротивления при параллельном соединении приемников. Следовательно, можно сказать, что при параллельном соединении катушек эквивалентная индуктивность меньше, чем у катушки с самой малой индуктивностью. Это объясняется тем, что общий ток, потребляемый цепью, больше токов в отдельных катушках. А раз общий ток больше, то можно считать, что влияние эквивалентной электродвижущей силы самоиндукции (соответствующей эквивалентной индуктивности цепи) на величину этого тока сказывается слабее.

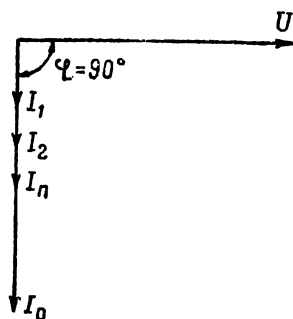


Рис. 132

Выводы.

1. При параллельном соединении нескольких катушек общий ток равен геометрической сумме токов отдельных катушек.
2. Параллельное соединение катушек уменьшает эквивалентную индуктивность цепи.

§ 74. СВОБОДНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

Последние две цепи, которые нам осталось рассмотреть, от предыдущих цепей отличаются тем, что в них наблюдается принципиально новое явление, называемое электрическим резонансом. Для понимания физической стороны этого явления необходимо предварительно ознакомиться со свободными электрическими колебаниями, которые, как увидим дальше, являются составной частью возникающих при резонансе физических процессов.

Под свободными электрическими колебаниями следует понимать синусоидальный переменный ток, который может возникнуть в замкнутом контуре, состоящем из катушки и конденсатора, при условии, что конденсатору будет сообщен электрический заряд от источника тока. Схема электрической цепи, при помощи которой можно получить свободные электрические колебания, изображена на рис. 133.

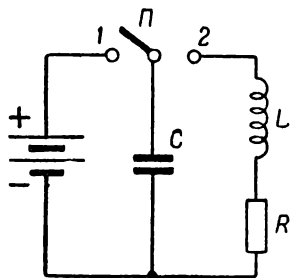


Рис. 133

Для сообщения конденсатору электрического заряда его достаточно подключить на очень короткое время к источнику постоянного тока с помощью однополюсного рубильника П. В результате полученного заряда на пластинах конденсатора

появляется собственное напряжение U_k (равное по величине напряжению источника постоянного тока), а электрическое поле конденсатора запасает энергию, величина которой определяется уже известной нам формулой

$$W_{эл} = \frac{U_k^2 C}{2} \text{ джоуль.}$$

Если теперь к конденсатору присоединить катушку (поставив рубильник в положение 2), то он, как источник мгновенного тока, станет разряжаться и этим вызовет в замкнутом контуре свободные электрические колебания в виде переменного синусоидального тока.

Линейные диаграммы тока в цепи i_c , собственного напряжения конденсатора u_k и возникающей в катушке электродвижущей силы самоиндукции e_L изображены на рис. 134. Углы сдвига фаз между током и собственным напряжением конденсатора, а также между током и электродвижущей силой самоиндукции соответствуют углам, которые были установлены при исследовании цепи с индуктивным сопротивлением (см. § 66)¹.

Будем считать для простоты, что активное сопротивление катушки равно нулю и, следовательно, в контуре невозможен расход электрической энергии. Физические процессы, которые возникали бы в контуре при отсутствии в нем активного сопротивления, можно представить в таком виде. С началом разряда конденсатора (после включения рубильника на катушку) в контуре появляется ток (на рис. 134 первая четверть периода), а вместе с ним и магнитное поле вокруг катушки.

По закону сохранения энергии энергия электрического поля конденсатора при этом расходуется на создание магнитного поля катушки и накапливается этим полем. В момент полного разряда конденсатора (в конце первой четверти периода) ток в цепи достигает наибольшего значения I_{cm} , а энергия электрического поля конденсатора полностью переходит в энергию магнитного поля катушки

$$W_m = \frac{I_{cm}^2 L}{2} \text{ джоуль.}$$

После этого ток в цепи уменьшается, но возникающая в катушке электродвижущая сила самоиндукции стремится поддержать

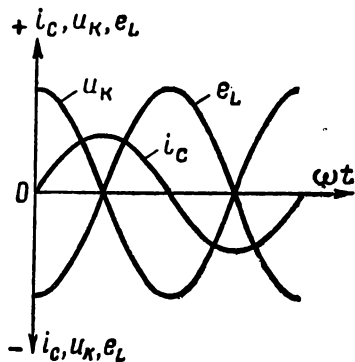


Рис. 134

¹ Собственное напряжение конденсатора U_k следует рассматривать как внешнее напряжение, приложенное к катушке.

его и таким образом заряжает конденсатор (в обратном направлении по сравнению с первоначальным). По мере уменьшения тока магнитное поле катушки ослабляется, а его энергия расходуется на создание электрического поля конденсатора.

В конце второй четверти периода ток в контуре прекращается, энергия магнитного поля катушки полностью переходит в энергию электрического поля конденсатора и после этого процесс лишь повторяется. Если бы в катушке действительно отсутствовало сопротивление, то в контуре постоянно наблюдался бы переменный синусоидальный ток в виде незатухающих свободных колебаний (рис. 135).

Частота таких свободных колебаний в контуре определяется формулой

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ герц,} \quad (99)$$

где L — коэффициент самоиндукции катушки в генри;

C — емкость конденсатора в фарадах.

Эта формула получается на основе равенства $\frac{U_{km}^2 C}{2} = \frac{I_{Cm}^2 L}{2}$, которое справедливо для контура при условии отсутствия в нем активного сопротивления (при этом энергия электрического поля конденсатора полностью переходит в энергию магнитного поля катушки и наоборот).

Для участка, образуемого в контуре конденсатором (§ 67), максимальное значение тока

$$I_{Cm} = U_{km} \omega C.$$

Подставив это значение тока в написанное выше равенство, получим

$$\frac{U_{km}^2 C}{2} = \frac{U_{km}^2 \omega^2 C^2 L}{2},$$

или после сокращения

$$1 = \omega^2 CL = (2\pi f)^2 CL.$$

Отсюда

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

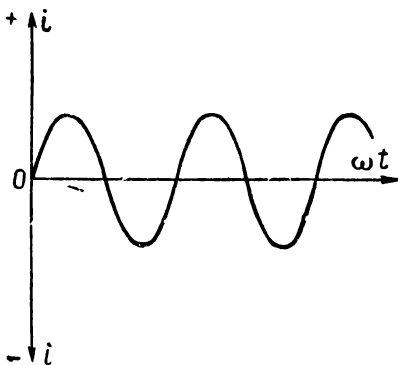


Рис. 135

Вследствие наличия в реальной катушке активного сопротивления в нем неизбежно расходуется энергия, получаемая конденсатором при первоначальном его заряде от источника тока. Поэтому амплитуда I_{cm} свободных колебаний в контуре постепенно уменьшается (рис. 136) и колебания через неко-

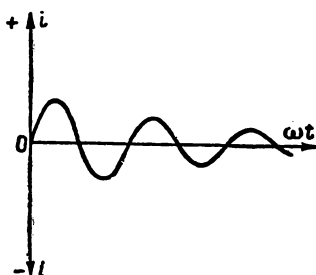


Рис. 136

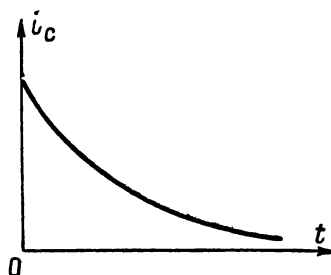


Рис. 137

торое время затухают. Частота затухающих электрических колебаний зависит и от величины активного сопротивления катушки, а потому определяется формулой

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \quad (100)$$

где R — активное сопротивление катушки.

При сравнительно большой величине активного сопротивления (когда $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$) свободных колебаний в контуре не возникает, а график разрядного тока конденсатора принимает вид, показанный на рис. 137. Такой разряд конденсатора на катушку называется аperiодическим.

Свободные электрические колебания (затухающие) в замкнутом контуре аналогичны механическим колебаниям, возникающим во всяком упругом теле под действием внутренних напряжений, вызываемых первоначально той или иной силой. Так, если балке, свободно лежащей на двух опорах (рис. 138), сообщить кратковременный толчок силой F , то в балке возникнут свободные колебания (балка будет попеременно изгибаться то в одну, то в другую сторону) под действием внут-

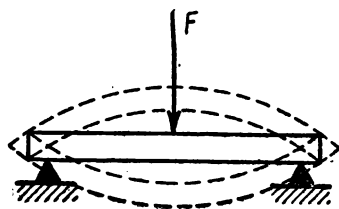


Рис. 138

ренних напряжений (сжатия и растяжения), возникающих в ее отдельных слоях. Частота этих колебаний будет зависеть от геометрических размеров балки и от ее жесткости, причем колебания всегда будут затухающими (энергия, затраченная внешней силой на первоначальный изгиб балки,

будет постепенно расходоваться на преодоление сопротивления воздуха, а также на преодоление сил трения в опорах балки).

Если в такт со свободными колебаниями балки на нее все время воздействовать внешней силой, вызывая вынужденные колебания такой же частоты, как и свободные, то в балке возникнет механический резонанс. Внешне резонанс проявляется в увеличении амплитуды колебаний балки (т. е. в увеличении прогиба балки) и может привести к ее разрушению, если внутренние напряжения, возникающие в балке, окажутся значительно больше допустимых.

Таким образом, механический резонанс объясняется равенством частот свободных и вынужденных колебаний упругого тела, а также совпадением этих колебаний по фазе (вынужденные колебания должны происходить в такт со свободными).

§ 75. ЦЕПЬ ИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНО. СОЕДИНЕННЫХ КАТУШКИ И КОНДЕНСАТОРА, РЕЗОНАНС ТОКОВ

Рассмотрение цепи из параллельно соединенных катушки и конденсатора знакомит нас с явлением резонанса токов, которое находит большое применение в радиотехнических устройствах.

Электрическая схема такой цепи изображена на рис. 139. О цепи известны следующие данные:

- 1) R и L — активное сопротивление и коэффициент самоиндукции катушки;
- 2) C — емкость конденсатора;
- 3) U — действующее значение приложенного напряжения цепи.

Необходимо:

- 1) построить векторные диаграммы для цепи;
2) получить формулы для определения общей величины
тока I_0 и мощности, потребляе-
мой цепью.

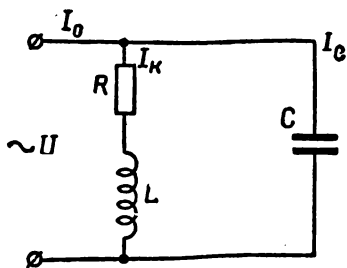


Рис. 139

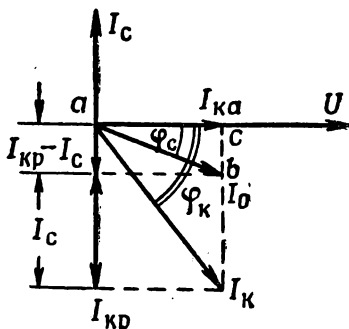


Рис. 140

Общей величиной для двух параллельных ветвей цепи является приложенное напряжение, векторная диаграмма которого приведена на рис. 140. Токи катушки и конденсатора, а также углы сдвига фаз этих токов относительно напряжения определяются следующими формулами:

а) для катушки

$$I_k = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}; \cos \varphi_k = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}; \varphi_k < +90^\circ;$$

б) для конденсатора

$$I_C = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}}; \cos \varphi_C = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \varphi_C = -90^\circ.$$

Построим векторные диаграммы токов (рис. 140).

Общий ток I_0 в цепи определим математически (можно и графически, см. предыдущую цепь). Для этого разложим ток катушки на две взаимно перпендикулярные составляющие — активную $I_{ka} = I_k \cos \varphi_k$ и реактивную $I_{kp} = I_k \sin \varphi_k$. Полученные в результате разложения токи, а также ток конденсатора сложим в следующем порядке. Сначала произведем геометрическое сложение векторов \vec{I}_C и \vec{I}_{kp} , а их геометрическую сумму, равную фактически их арифметической разности $\vec{I}_{kp} - \vec{I}_C$ (из-за противоположного направления векторов \vec{I}_C и \vec{I}_{kp}), сложим с вектором \vec{I}_{ka} . Из треугольника токов abc , образовавшегося в результате сложения векторов, найдем числовое значение общего тока по формуле

$$I_0 = \sqrt{I_{ka}^2 + (I_{kp} - I_C)^2} = \sqrt{(I_k \cos \varphi_k)^2 + (I_k \sin \varphi_k - I_C)^2}. \quad (101)$$

Из этого же треугольника определим общий $\cos \varphi$:

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{ka}}{I_0} = \frac{I_k \cos \varphi_k}{I_0}. \quad (102)$$

Зная общую величину тока [формула (101)] и общий $\cos \varphi$ в цепи, определим и мощность, потребляемую цепью, по общей формуле

$$P_0 = UI_0 \cos \varphi_0.$$

Из-за отсутствия активного сопротивления у конденсатора эта мощность фактически расходуется катушкой.

В рассматриваемой цепи, как уже говорилось в начале параграфа, может наблюдаться явление, называемое резонансом токов. Внешне резонанс проявляется в том, что общая величина тока в цепи I_0 при нем становится в несколько раз меньше, чем величины токов катушки и конденсатора, чего никогда не бывает в цепях постоянного тока.

Для получения резонанса токов необходимо выполнить два условия: 1) иметь незначительное активное сопротивление у катушки, 2) добиться равенства

$$X_L = X_C, \quad (103)$$

где $X_L = 2\pi fL$ — индуктивное сопротивление катушки;

$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ — емкостное сопротивление конденсатора.

При выполнении первого условия ($R_k \approx 0$) угол сдвига фаз φ_k между током катушки и напряжением, приложенным к цепи, приближается к 90° , а полное сопротивление катушки $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_L^2}$ немногим отличается от ее индуктивного сопротивления ($Z_k \approx X_L$).

Второе условие дает возможность получить в параллельных ветвях цепи примерно одинаковые токи $I_C = \frac{U}{X_C}$ и $I_k = \frac{U}{X_L}$ (благодаря наличию активного сопротивления в катушке ее ток получается все же несколько меньше тока конденсатора).

Векторная диаграмма резонанса токов изображена на рис. 141. Из диаграммы видно, что благодаря равенству токов I_C и I_k , а также благодаря тому, что угол φ_k очень близок к 90° , общий ток в цепи I_0 , действительно, получается значительно меньше токов параллельных ветвей и, кроме того, почти совпадает с приложенным напряжением по фазе.

Резонанс токов аналогичен механическому резонансу в том отношении, что он также возникает благодаря равенству частот свободных и вынужденных колебаний в контуре, образуемом катушкой и конденсатором. Под вынужденными колебаниями в контуре следует понимать переменный ток, который поддерживается в цепи приложенным к ней напряжением. Что же касается свободных колебаний, то они (§ 74) могут возникнуть в том же контуре под действием конденсатора, получающего заряд от источника тока.

Равенство частот свободных и вынужденных колебаний в контуре, состоящем из катушки и конденсатора, при резонансе токов доказать нетрудно. Частота свободных колебаний зависит от параметров контура (т. е. от величин L и C) и определяется формулой

$$f_{св} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

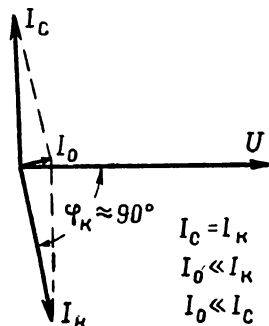


Рис. 141

Выразим частоту переменного тока в цепи (т. е. частоту вынужденных колебаний в контуре) через те же параметры, исходя из основного условия резонанса

$$X_L = X_C.$$

Подставив в это равенство значения сопротивлений, получим

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC},$$

отсюда частота тока

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Таким образом, при резонансе токов, действительно, частота свободных колебаний равна частоте вынужденных колебаний.

Значительное увеличение токов I_C и I_L в параллельных ветвях при резонансе по сравнению с общим током I_0 физически и объясняется тем, что свободные колебания, возникающие в контуре, складываются с токами, которые вызываются в контуре источником тока. Свободные колебания при этом являются незатухающими, так как источник тока все время покрывает потери в активном сопротивлении катушки путем сообщения ей мощности

$$P = UI_0 \cos \varphi_0.$$

Резонанс токов можно получить двумя способами: либо путем изменения частоты тока источника, питающего цепь, доведя ее до частоты свободных колебаний (не изменяя параметров контура L и C), либо, наоборот, доведением частоты свободных колебаний (путем изменения параметров L и C) до частоты источника тока. На практике обычно прибегают ко второму способу, что удобнее, так как не нужно изменять частоту тока источника.

Контур, у которого параметры L и C подобраны для получения резонанса токов на заданной частоте источника тока, называется настроенным контуром.

Резонанс токов широко используется в радиотехнике для усиления токов, а также в электрических фильтрах, т. е. особых электрических цепях из катушек и конденсаторов, пропускающих через себя токи определенной частоты.

Вследствие небольшой величины общего тока I_0 , потребляемого цепью при резонансе токов, можно считать, что контур как бы оказывает значительное сопротивление току той частоты, на которую он настроен. Это свойство контура и используется в тех случаях, когда по какому-либо участку цепи нежелательно пропускать ток определенной частоты (контур

настраивают на эту частоту и включают последовательно с участком).

На рис. 142 изображена кривая зависимости общего тока в рассматриваемой цепи от частоты этого же тока. Из кривой видно, что при резонансной частоте, т. е. при частоте, на которую настроен контур, общий ток получается меньше, чем при всех других частотах. Это объясняется тем, что если частота тока меньше резонансной ($f < f_{\text{рез}}$), то уменьшается индуктивное сопротивление катушки, а емкостное сопротивление

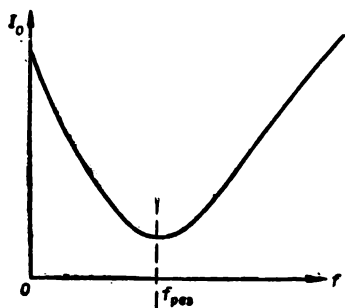


Рис. 142

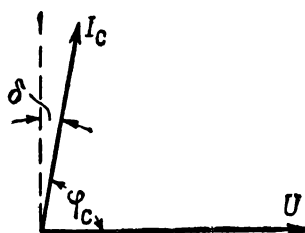


Рис. 143

конденсатора, наоборот, растет; если же частота тока больше резонансной ($f > f_{\text{рез}}$), то уменьшается емкостное сопротивление конденсатора, индуктивное же сопротивление катушки растет. В первом случае увеличивается ток катушки, а во втором — ток конденсатора, однако и то и другое ведет к увеличению общего тока, потребляемого цепью (геометрическая сумма токов параллельных ветвей в обоих случаях увеличивается).

В заключение следует отметить одно обстоятельство, касающееся конденсатора. До сих пор мы считали, что конденсатор не потребляет в цепи мощности из-за отсутствия у него активного сопротивления. Опыт, однако, показывает, что при продолжительной работе в цепи конденсатор несколько нагревается и, следовательно, потребляет от источника мощность, правда небольшую. Объясняется это тем, что в изолирующем слое конденсатора все же имеется незначительное количество свободных электронов (идеальных диэлектриков нет), которые своим движением и создают ток проводимости в конденсаторе.

Изолирующий слой конденсатора оказывает сопротивление току проводимости, на преодоление которого и расходуется энергия источника. Наличие потерь энергии в изолирующем слое конденсатора вносит небольшое изменение в векторную диаграмму для цепи с конденсатором (рис. 143). Из диаграммы видно, что в реальной цепи ток опережает напря-

жение не на 90° , а на несколько меньший угол φ_C , при котором потребляемая конденсатором мощность уже не равна нулю:

$$P = UI \cos \varphi_C \neq 0.$$

Потери энергии в конденсаторе принято характеризовать величиной тангенса угла δ , т. е. угла, на который отличается истинный угол сдвига фаз между током и напряжением от 90° (рис. 143). Этот угол называют также углом потерь в диэлектрике. Для различных изолирующих материалов и при различных частотах переменного тока угол δ имеет разное значение. Числовая величина угла δ не превышает нескольких минут. Несмотря на незначительные потери энергии в конденсаторе, с ними все же приходится иногда считаться на практике и главным образом в радиотехнике.

Выводы.

1. Общий ток в цепи из параллельно соединенных катушки и конденсатора равен геометрической сумме токов параллельных ветвей.

2. При незначительной величине активного сопротивления катушки и при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений параллельных ветвей в цепи возникает резонанс токов.

§ 76. ЦЕПЬ ИЗ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ КАТУШКИ И КОНДЕНСАТОРА. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

В цепи, состоящей из последовательно соединенных катушки и конденсатора (рис. 144), также возникает электрический резонанс, называемый резонансом напряжений. Кроме того, такая цепь позволяет получать угол сдвига фаз между двумя токами в 90° . Эта последняя особенность цепи имеет большое практическое значение, так как дает возможность создавать вращающееся магнитное поле, используемое в двигателях переменного тока (образование поля рассматривается в следующей главе).

Известны следующие данные о цепи:

1) R и L — активное сопротивление и коэффициент самоиндукции катушки;

2) C — емкость конденсатора;

3) U — действующее значение напряжения, приложенного к цепи.

Необходимо:

1) построить векторные диаграммы для тока и напряжения;

2) получить формулы закона Ома и мощности для цепи.

Общей величиной для всех трех простейших участков цепи (рис. 144)

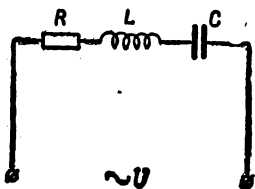


Рис. 144

является величина тока I . Построим для нее векторную диаграмму (рис. 145).

Проходя по участкам цепи, ток расходует на них приложенное напряжение в виде трех падений напряжения: активного $U_R = IR$, совпадающего по фазе с током; индуктивного $U_L = IX_L$, опережающего ток по фазе на $\varphi_k = +90^\circ$; емкостного $U_C = IX_C$, отстающего от тока на $\varphi_c = -90^\circ$.

Построим векторные диаграммы падений напряжения (рис. 145), считая что $X_L > X_C$, а следовательно, и $U_L > U_C$.

Для получения вектора приложенного напряжения сложим векторы \vec{U}_R , \vec{U}_L и \vec{U}_C в следующем порядке: сначала произведем геометрическое сложение векторов \vec{U}_L и \vec{U}_C , а их геометрическую сумму, равную арифметической разности $U_L - U_C$, сложим с вектором \vec{U}_R . Из треугольника напряжений abc определим числовое значение приложенного к цепи напряжения

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

Подставив в последнюю формулу значения падений напряжения, получим

$$U = \sqrt{I^2 [R^2 + (X_L - X_C)^2]} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Отсюда величина тока в цепи

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}, \quad (104)$$

или

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

где $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ — полное сопротивление в цепи.

Формула (104) представляет собой математическое выражение закона Ома для цепи.

Из треугольника напряжений можно получить треугольники мощностей и сопротивлений, а по этим треугольникам вывести формулы для мощности и $\cos \varphi$:

$$P = UI \cos \varphi \text{ и } \cos \varphi = \frac{R}{Z}.$$

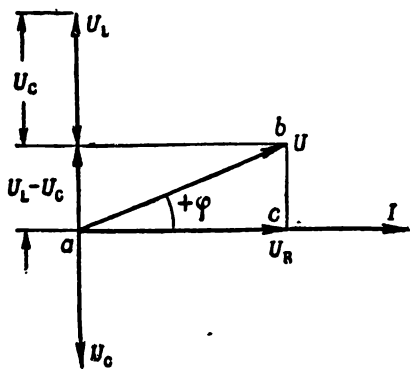


Рис. 145

Из рис. 145 видно, что благодаря большей величине индуктивного сопротивления по сравнению с емкостным угол сдвига фаз между током и приложенным напряжением получается положительный, т. е. цепь проявляет себя как индуктивная нагрузка по отношению к источнику.

Нетрудно понять, что при обратном соотношении сопротивлений, т. е. при $X_L < X_C$, угол сдвига фаз между током и напряжением получается отрицательный и цепь проявляет себя как емкостная нагрузка. Векторная диаграмма для такого случая изображена на рис. 146. Формула закона Ома (104) при этом остается без

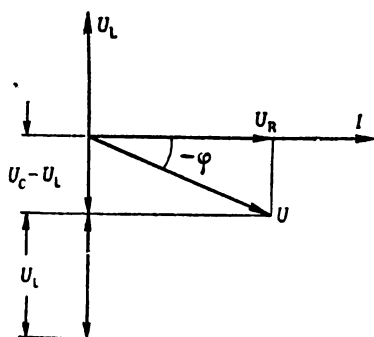


Рис. 146

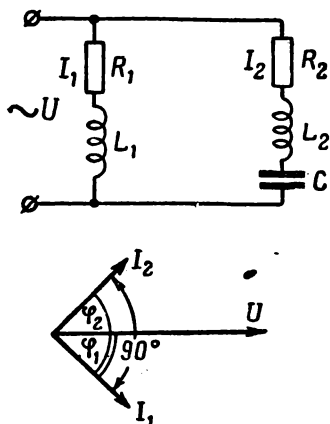


Рис. 147

изменения, так как отрицательная разность $X_L - X_C$, возведенная в квадрат, дает положительное число.

Возможность изменения величины и знака угла сдвига фаз между током и приложенным напряжением путем изменения емкости конденсатора позволяет получать угол сдвига фаз в 90° между двумя токами. Для этого параллельно с рассматриваемой цепью включают еще одну катушку (рис. 147, а).

Ток I_1 в этой катушке отстает от приложенного напряжения на некоторый угол φ_1 (в зависимости от соотношения между R_1 и L_1), как показано на рис. 147, б.

Для тока I_2 другой катушки, соединенной последовательно с конденсатором, можно путем изменения емкости конденсатора получить любой угол сдвига фаз, в том числе и такой (φ_2), который дополняет собой угол сдвига фаз φ_1 до 90° . Так практически достигается сдвиг по фазе на 90° между токами двух параллельно включенных катушек.

Теперь рассмотрим резонанс напряжений, который может возникнуть в цепи при некоторых условиях.

Внешне резонанс напряжений проявляется в том, что напряжения на индуктивном и емкостном сопротивлениях имеют

значительно бóльшую величину, чем напряжение, приложенное к цепи, чего никогда не наблюдается в цепях постоянного тока.

Для получения резонанса напряжений необходимо выполнить те же самые условия, что и для резонанса токов: иметь незначительное активное сопротивление катушки ($R \ll X_L$) и добиться в цепи равенства $X_L = X_C$. При выполнении этих условий в цепи произойдут следующие изменения.

Во-первых, ток резко возрастет, что подтверждается формулой (104), которая при $X_L = X_C$ принимает вид $I = \frac{U}{R}$.

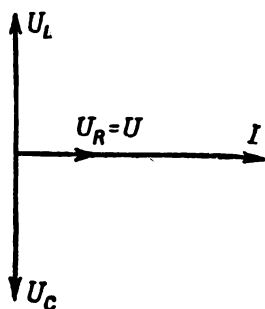


Рис. 148

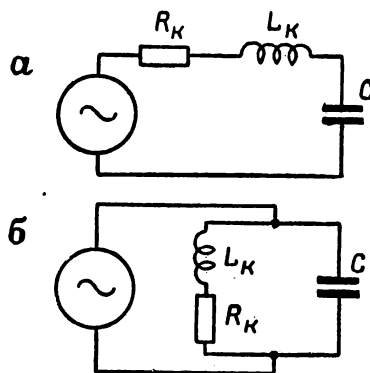


Рис. 149

Во-вторых, падения напряжения в индуктивном и емкостном сопротивлениях, т. е. $U_L = IX_L$ и $U_C = IX_C$, будут равны между собой, а по величине каждое из них значительно превысит активное падение напряжения $U_R = IR$ (так как $R \ll X_L$ и X_C).

Векторная диаграмма для резонанса напряжений изображена на рис. 148. Из диаграммы видно, что приложенное к цепи напряжение U по величине фактически равно активному падению напряжения U_R благодаря взаимной компенсации индуктивного U_L и емкостного U_C падений напряжения; а так как эти падения напряжения значительно превосходят активное падение напряжения, то в такой же мере они превосходят при резонансе и приложенное к цепи напряжение.

Причиной резонанса напряжений, как и резонанса токов, является равенство частот свободных и вынужденных колебаний, которые возникают в рассматриваемой цепи. Неизбежность возникновения свободных колебаний в цепи объясняется тем, что эта цепь вместе с источником тока образует замкнутый контур (рис. 149, а), включающий в себя катушку и конденсатор, а этого вполне достаточно для появления свободных колебаний.

Таким образом, рассматриваемый контур отличается от контура предыдущей цепи (рис. 139) тем, что в него входит и сам источник тока, тогда как при резонансе токов источник находится вне контура (рис. 149, б).

Значительное увеличение индуктивного и емкостного падений напряжения по сравнению с приложенным напряжением физически объясняется суммированием в цепи свободных и вынужденных колебаний, что равносильно увеличению тока в цепи, а следовательно, и увеличению указанных падений напряжения ($U_L = IX_L$ и $U_C = IX_C$).

Резонанс напряжений, как и резонанс токов, можно получить теми же двумя способами — изменением частоты источника тока либо изменением параметров цепи L и C .

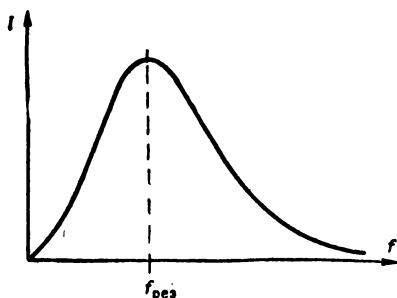


Рис. 150

На практике резонанс напряжений используется главным образом в радиотехнике для повышения напряжений, а также в электрических фильтрах.

Вследствие большой величины тока при резонансе ($I = \frac{U}{R}$) можно считать, что цепь оказывает незначительное сопротивление току той частоты, на которую она настроена.

Это свойство используется в тех случаях, когда по какому-либо участку цепи желательно пропустить ток определенной частоты (цепь настраивают на эту частоту и включают последовательно с участком).

На рис. 150 изображена кривая зависимости тока, проходящего по цепи, от его частоты. Из кривой видно, что при резонансной частоте $f_{рез}$, т. е. при частоте, на которую настроена цепь, ток имеет наибольшее значение, а токи всех других частот меньше этого тока. Объясняется это тем, что при $f < f_{рез}$ увеличивается емкостное сопротивление конденсатора, а при $f > f_{рез}$ — индуктивное сопротивление катушки;

однако и то и другое согласно формуле
$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$$

приводит к увеличению знаменателя, а значит и к уменьшению тока в цепи.

Выводы.

1. При незначительной величине активного сопротивления катушки и при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений в цепи наступает резонанс напряжений.

2. Цепь позволяет создавать угол сдвига фаз в 90° между токами двух параллельно соединенных катушек.

§ 77. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ И ПУЛЬСИРУЮЩИЕ ТОКИ. ЗАКОН НЕЗАВИСИМОСТИ ТОКОВ

Мы рассмотрели основные законы и особенности синусоидального переменного тока. Теперь ознакомимся с несинусоидальными токами, которые довольно широко используются на практике главным образом в радиотехнике, радиолокации, а также в телефонии. Несинусоидальными токами называются такие токи, которые изменяются периодически, как и синусоидальный ток, но по более сложным законам.

Из рис. 151 видно, что несинусоидальные токи могут изменяться с течением времени либо по величине и направлению (рис. 151, а), либо только по величине (рис. 151, б). Несинусоидальные токи, изменяющиеся по величине, называют также пульсирующими токами. Для получения того или иного несинусоидального тока необходимо напряжение, изменяющееся по тому же закону, что и несинусоидальный ток.

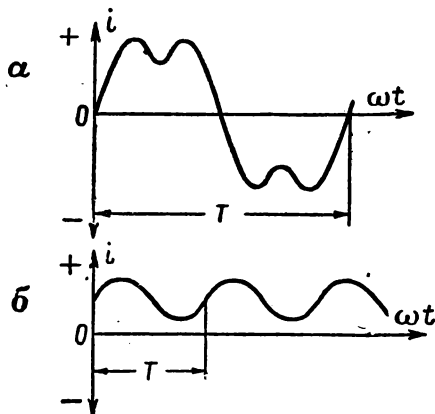


Рис. 151

Известно, что любую кривую, изображающую закон периодического изменения какой-либо величины, можно разложить на составляющие в виде синусоид различной частоты, амплитуды и начальной фазы, а в отдельных случаях наряду с синусоидами можно получить еще и постоянную составляющую — прямую линию, параллельную оси абсцисс. На основании этого закон изменения несинусоидального напряжения в общем виде может быть выражен формулой

$$u = U_0 + U_{m1} \sin(\omega t + \psi_1) + \\ + U_{m2} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + U_{mn} \sin(n\omega t + \psi_n), \quad (105)$$

где U_0 — постоянная составляющая несинусоидального напряжения, т. е. некоторое напряжение постоянного тока;

$U_{m1}, U_{m2}, \dots, U_{mn}$ — амплитуды синусоидальных составляющих напряжения;

$\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ — углы начальных фаз синусоидальных составляющих (в отдельных случаях углы могут быть равны нулю).

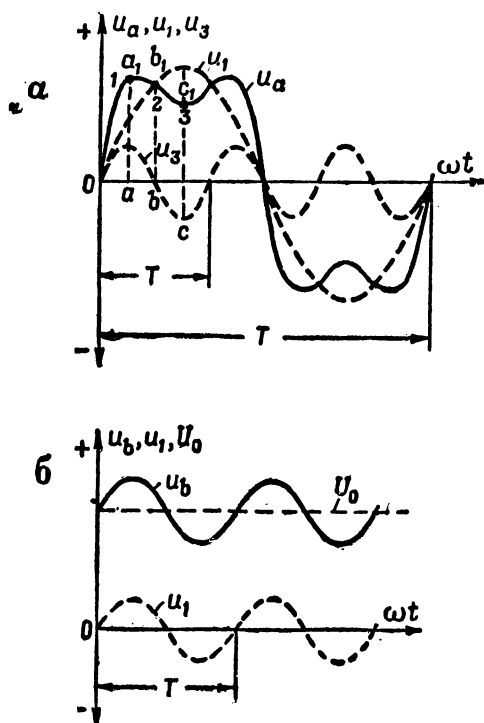


Рис. 152

Синусоидальные составляющие несинусоидального напряжения принято называть гармоническими колебаниями напряжения или просто гармониками напряжения. Гармоника $U_{m1} \sin(\omega t + \psi_1)$, имеющая частоту, одинаковую с частотой несинусоидального напряжения, называется первой гармоникой. Все остальные гармоники получаются кратными ей.

В зависимости от закона изменения несинусоидального напряжения число гармоник в формуле может быть различным, причем сами гармоники в отдельных случаях могут быть либо только четными (если коэффициенты при ω — четные числа), либо нечетными. Числовые значения постоянной составляющей

U_0 , амплитуд гармоник, а также углов начальных фаз ($\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$) в каждом случае вычисляются по особым формулам.

На рис. 152 изображены графики несинусоидальных напряжений u_a (рис. 152, а) и u_b (рис. 152, б), а также графики составляющих этих напряжений (пунктирные линии). В соответствии с формулой (105) для напряжений u_a и u_b следует написать

$$u_a = U_{m1} \sin \omega t + U_{m3} \sin 3\omega t;$$

$$u_b = U_0 + U_{m1} \sin \omega t.$$

Сложение составляющих несинусоидального напряжения по их графикам производят следующим образом. Из точек оси времени восставляют ряд перпендикуляров (aa_1, bb_1, cc_1 на рис. 152, а) и на них откладывают (начиная от оси времени) алгебраическую сумму соответствующих мгновенных значений составляющих несинусоидального напряжения. Отметки, сделанные на перпендикулярах (точки 1, 2, 3 на рис. 152, а), соединяют плавной линией и получают график несинусоидального напряжения.

Для напряжения, изменяющегося по прямоугольной кривой (рис. 153, а), формула (105) имеет такой вид

$$u = \frac{4}{\pi} U_m \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots + \frac{1}{k} \sin k\omega t \right),$$

где U_m — наибольшее значение несинусоидального напряжения.

Для пульсирующего напряжения (рис. 153, б)

$$u = \frac{U_m}{2} + \frac{2U_m}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots + \frac{1}{k} \sin k\omega t \right).$$

Возможность разложения несинусоидальных напряжений на синусоидальные составляющие значительно упрощает исследование цепей, питаемых такими напряжениями, и сводит его к следующему.

Ввиду того что составляющие несинусоидального напряжения являются реальными (а не теоретическими), действие каждой из них приводит к появлению в цепи соответствующего тока (синусоидального или постоянного в зависимости от характера составляющей) точно так же, как если бы в этой цепи действовала только одна из составляющих. Сами составляющие несинусоидального напряжения можно рассматривать как результат действия в цепи отдельных источников тока, соединенных между собой последовательно (при последовательном соединении источников их электродвижущие силы, а следовательно, и напряжения складываются, § 22).

Наличие в цепи токов, вызываемых составляющими несинусоидального напряжения, подтверждается опытом. Так, если несинусоидальное напряжение приложить к последовательно соединенным катушке и конденсатору (рис. 144), то в цепи установится определенный ток, действующее значение которого (по тепловому эффекту) может быть измерено тепловым прибором.

Стоит, однако, настроить цепь на частоту, равную частоте одной из составляющих несинусоидального напряжения, как в цепи наступит резонанс напряжений и ток резко возрастет за счет увеличения тока именно указанной составляющей напряжения. Такое свойство составляющих несинусоидального напряжения вызывать в цепи

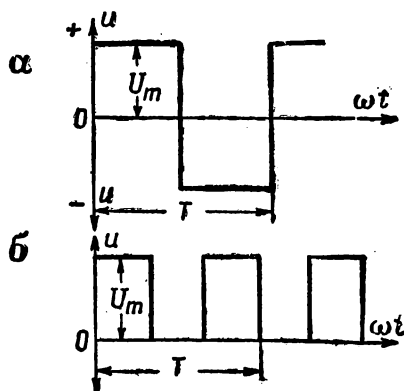


Рис. 153

самостоятельно свои токи иногда называют законом независимости токов в цепи.

С действием этого закона мы фактически уже встречались, когда рассматривали влияние электродвижущей силы самоиндукции на величину тока при включении электрических цепей. Закон Ома для неустановившегося режима мы тогда писали в таком виде

$$i = \frac{E - e_L}{R} = \frac{E}{R} - \frac{e_L}{R},$$

а эта формула как раз и означает, что каждая из электродвижущих сил вызывает в цепи свой ток самостоятельно. Токи, вызываемые отдельными составляющими несинусоидального напряжения (или электродвижущей силы), складываются и дают в цепи результирующий несинусоидальный ток, поэтому их можно назвать составляющими этого тока.

Итак, пусть к цепи (рис. 144) приложено несинусоидальное напряжение

$$u = U_0 + U_{m1} \sin \omega t + U_{m2} \sin 2\omega t + \dots + U_{mn} \sin n\omega t,$$

где U_0 , U_{m1} , U_{m2} , ..., U_{mn} нам известны по числовой величине. Параметры цепи, т. е. R , L и C , также известны.

Необходимо получить формулы для определения действующего значения несинусоидального тока в цепи, а также формулу для вычисления мощности, потребляемой цепью.

На основании уже известных законов о переменном синусоидальном токе для действующих значений токов, вызываемых составляющими несинусоидального напряжения, можно написать

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1}; I_2 = \frac{U_2}{Z_2}; \dots; I_n = \frac{U_n}{Z_n},$$

где $Z_n = \sqrt{R^2 + (X_{Ln} - X_{Cn})^2}$.

Постоянная составляющая напряжения U_0 не вызовет тока в данной цепи, так как конденсатор не пропускает постоянного тока.

Зная действующие значения токов, можно подсчитать и мощности, расходуемые этими токами в активном сопротивлении цепи, по формулам

$$P_1 = I_1^2 R; P_2 = I_2^2 R; \dots; P_n = I_n^2 R.$$

Сложив эти мощности, получим полную мощность, потребляемую цепью:

$$P_0 = I_1^2 R + I_2^2 R + \dots + I_n^2 R. \quad (106)$$

Полную же мощность можно определить и так:

$$P_0 = I^2 R,$$

где I — действующее значение несинусоидального тока в цепи.

Подставив это значение полной мощности в формулу (106), получим

$$I^2 R = I_1^2 R + I_2^2 R + \dots + I_n^2 R,$$

или после сокращения на R^1

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2.$$

Отсюда действующее значение несинусоидального тока в цепи

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}.$$

Если в цепи действует постоянная составляющая (U_0) несинусоидального напряжения, то последняя формула принимает вид:

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}, \quad (107)$$

где $I_0 = \frac{U_0}{R}$ (для цепей, в которых нет конденсатора).

Аналогичными рассуждениями можно получить формулу для действующего значения приложенного несинусоидального напряжения

$$U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}. \quad (108)$$

Применив в отношении рассматриваемой цепи общую формулу для мощности синусоидального тока, мы можем написать для полной мощности, потребляемой цепью:

$$P_0 = I^2 R = UI \cos \varphi,$$

где $\cos \varphi$ — эквивалентный для данной цепи.

Числовое значение его определяется на основании показаний измерительных приборов (ваттметра, вольтметра и амперметра) по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}.$$

Выводы.

1. При несинусоидальном напряжении в цепи возникают отдельные синусоидальные токи (а иногда и постоянный ток) под действием составляющих несинусоидального напряжения. Эти токи являются составляющими токами общего несинусоидального тока в цепи.

2. Действующие значения синусоидальных составляющих определяются по известным законам переменного синусоидального тока.

3. Действующие значения несинусоидального тока и приложенного к цепи напряжения определяются по формулам (107) и (108).

¹ Поверхностный эффект в данном случае не учитывается.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ V

1. Что называется переменным синусоидальным током?
 2. В чем заключается свойство мгновенных значений?
 3. Что такое период и частота переменного тока и какова зависимость между ними?
 4. Как получается переменная синусоидальная электродвижущая сила в генераторах?
 5. Чем вызвана необходимость применения электрических градусов и какова зависимость между электрическими и геометрическими градусами?
 6. От чего зависит частота переменного тока в генераторах и какова зависимость между частотой и угловой частотой?
 7. Что следует понимать под действующим значением переменного тока?
 8. Что такое фаза переменной электрической величины?
 9. Какие величины называются совпадающими и какие — сдвинутыми по фазе?
 10. На чем основано применение векторных диаграмм и в чем их преимущество перед линейными диаграммами?
 11. Какие необходимо соблюдать правила при пользовании векторными диаграммами?
 12. В чем отличие активного сопротивления от омического и что представляет собой поверхностный эффект?
 13. Каков физический смысл индуктивного и емкостного сопротивлений?
 14. Каковы особенности цепи с активным сопротивлением?
 15. Каковы особенности цепи с индуктивным сопротивлением?
 16. Каковы особенности цепи с емкостным сопротивлением?
 17. Каков порядок исследования сложных цепей переменного тока?
 18. Что учитывается величиной $\cos \varphi$ в формуле мощности?
 19. Каковы особенности цепи с реальной катушкой?
 20. Что называется эквивалентной индуктивностью и как она вычисляется при последовательном соединении катушек?
 21. Какие изменения происходят в катушке при внесении в нее железного сердечника?
 22. Каково практическое использование катушки с железным сердечником?
 23. Каковы особенности цепи из последовательно соединенных активного сопротивления и конденсатора?
 24. По какой формуле определяется эквивалентная индуктивность при параллельном соединении катушек?
 25. Как определяется общий ток при параллельном соединении катушек?
 26. Что такое свободные электрические колебания и от чего зависят их частота?
 27. Каковы условия возникновения механического резонанса?
 28. Каковы условия получения в цепи резонанса токов и в чем состоит физическая сущность резонанса?
 29. Каковы особенности цепи из параллельно соединенных катушки и конденсатора?
 30. В чем заключается практическое использование резонанса токов?
 31. Каковы особенности цепи из последовательно соединенных катушки и конденсатора?
 32. При каких условиях наступает в цепи резонанс напряжений и как его практическое использование резонанса?
 33. Что называется несинусоидальными токами и напряжениями?
 34. Что называется пульсирующими токами?
 35. Каковы особенности цепей с несинусоидальными приложенными напряжениями?
 36. В чем заключается закон независимости токов?
-

ГЛАВА VI

ТРЕХФАЗНЫЙ ТОК

§ 78. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Рассмотренный нами переменный ток не имеет особых преимуществ перед постоянным током, поэтому сравнительно редко применяется для питания приемников электрической энергии.

В 80-х годах прошлого столетия русский инженер М. О. Доливо-Добровольский обосновал теоретически и доказал на практике рациональность применения системы трех синусоидальных переменных токов одинаковой частоты, но сдвинутых один относительно другого по фазе на угол в 120° . Такая система синусоидальных токов называется трехфазным током. В отличие от трехфазного тока, обычный синусоидальный называют также однофазным током. В основе теории трехфазного тока лежат законы синусоидального тока, поэтому особых трудностей для изучения трехфазный ток не представляет.

По сравнению с однофазным током трехфазный ток обладает двумя весьма важными преимуществами:

1) обеспечивает значительную экономию металла (по весу на 25%) проводов, передающих электрическую энергию от источников тока к приемникам;

2) дает возможность применять очень простые, дешевые и надежные в работе электрические двигатели.

Вследствие этих преимуществ трехфазный ток в настоящее время является основным током, широко используемым для разнообразных практических целей.

Трехфазный ток получается при помощи генераторов трехфазного тока. Статоры этих генераторов имеют не одну (как у однофазных генераторов), а три совершенно одинаковые обмотки, сдвинутые в пространстве одна относительно другой своими началами H_1, H_2, H_3 и концами K_1, K_2, K_3 на угол в 120° (рис. 154). Для наглядности статор трехфазного генератора на рис. 154 изображен без верхней половины, причем каждая обмотка показана состоящей из одного витка.

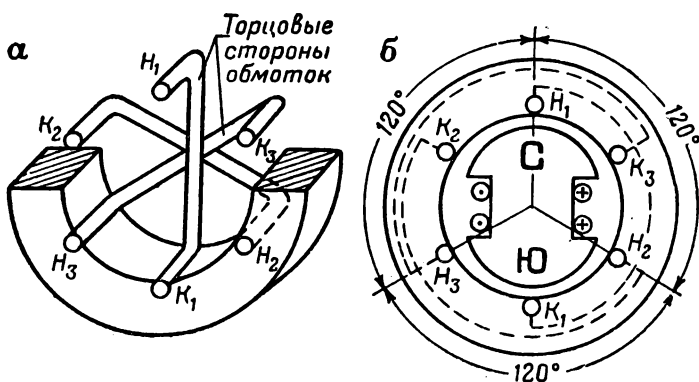


Рис. 154

Для удобства монтажа торцы витков несколько удлиняются и отгибаются к задней поверхности статора, как это показано на рис. 154, б пунктиром. Обозначение начал H и концов K , так же как и нумерация обмоток, условны. Однако если какая-либо обмотка принята за первую, а один из ее выводов за начальный H_1 , то через 120° от этого начала (по часовой стрелке или против нее) на статоре должно быть начало второй обмотки H_2 , а еще через 120° начало третьей H_3 .

При таком расположении обмоток в них при вращении ротора индуктируются электродвижущие силы e_1, e_2, e_3 , сдвинутые по фазе на 120° .

Векторные и линейные диаграммы электродвижущих сил в соответствии с начальным положением ротора (рис. 154, б) построены на рис. 155, а и 155 б. Амплитудные значения электродвижущих сил равны между собой вследствие одинакового выполнения статорных обмоток.

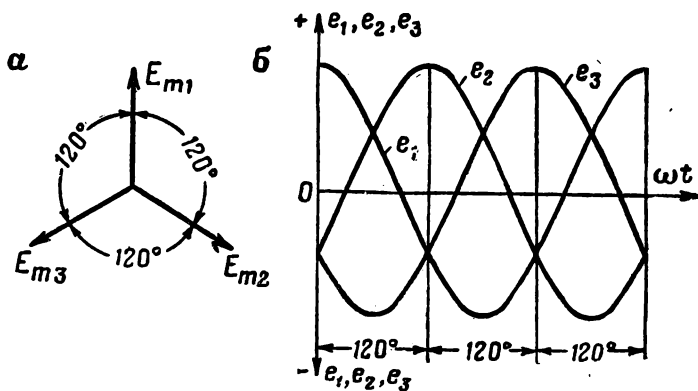


Рис. 155

Если к обмоткам присоединить одностипные приемники, например лампы (рис. 156, а), то в образовавшихся трех цепях возникнут синусоидальные токи i_1, i_2, i_3 , также сдвинутые по фазе на 120° (рис. 156, б). Следовательно, токи во всех трех цепях в любой момент времени находятся в различных фазах, отсюда и ток получил название трехфазного.

Вследствие наличия различных фаз у токов каждую из трех цепей, а также их отдельные участки, т. е. обмотки генератора, питающие провода и приемники электрической энергии, принято называть фазами. Такое понимание термина «фаза», конечно, условно, так как в подлинном смысле фаза означает лишь отдельное состояние изменения переменной величины.

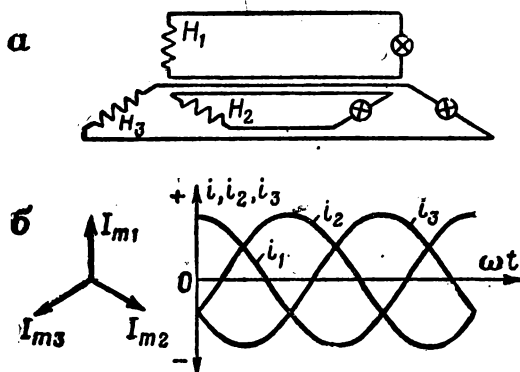


Рис. 156

Итак, в дальнейшем будем считать, что генераторы и приемники трехфазного тока имеют по три фазы, причем у генераторов все три фазы всегда одинаковы (по числу витков и по сопротивлению Z), у приемников же они могут быть и разными.

Приемники трехфазного тока, имеющие одинаковые фазы, служат равномерной нагрузкой для генератора трехфазного тока. На практике равномерную нагрузку составляют обычно двигатели трехфазного тока (силовая нагрузка), у которых статоры, как и у генераторов, имеют три одинаковые обмотки, или фазы, сдвинутые началами и концами на 120° .

Приемники, имеющие неодинаковые фазы, образуют неравномерную нагрузку генератора. Примером неравномерной нагрузки могут служить осветительные приемники (электрические лампы) и бытовые нагревательные приборы, которые включаются параллельно в каждую фазу в различном количестве, а это приводит к различным по величине сопротивлениям фаз.

По отношению к каждой фазе, понимаемой в данном случае как одна из трех цепей, изображенных на рис. 156, а, при-

менимы все законы синусоидального переменного тока. Так, в случае равномерной нагрузки действующие значения токов во всех трех фазах получаются одинаковыми и могут быть вычислены по формуле

$$I_{\phi} = \frac{E_{\phi}}{Z_{\phi}},$$

где E_{ϕ} — действующее значение электродвижущей силы в фазе генератора;

Z_{ϕ} — полное сопротивление фазы (включая сопротивление обмотки генератора, питающих проводов и приемника).

В результате прохождения токов по фазам на зажимах обмоток генератора устанавливаются одинаковые напряжения

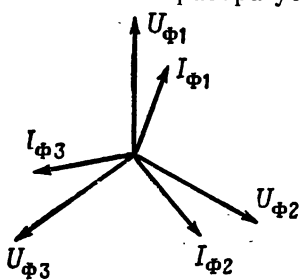


Рис. 157

($U_{\phi 1}, U_{\phi 2}, U_{\phi 3}$), сдвинутые между собой на 120° ; по отношению же к токам угол сдвига фаз φ этих напряжений определяется соотношением сопротивлений в фазах приемника $\cos \varphi = \frac{R}{Z}$.

Векторные диаграммы токов и напряжений всех трех фаз для равномерной нагрузки изображены на рис. 157.

§ 79. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ФАЗ ГЕНЕРАТОРОВ И ПРИЕМНИКОВ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Раздельное питание фаз приемников трехфазного тока от генератора (рис. 156, а) на практике не применяется вследствие большого количества (шесть) питающих проводов. Трехфазный ток позволяет при неравномерной нагрузке обойтись четырьмя проводами, а при равномерной — даже тремя, для чего в первом случае фазы генератора, а также приемника соединяют между собой в звезду с нулевым проводом, а во втором случае — либо в звезду, либо в треугольник.

Рассмотрим каждое из отмеченных соединений фаз в отдельности и выясним, на чем основана возможность таких соединений.

На рис. 158 изображена электрическая схема питания неравномерной нагрузки от трехфазного генератора. Эта схема отличается от схемы, изображенной на рис. 156, а тем, что в ней концы фаз генератора и приемника соединены в общие точки O_g и O_n , благодаря чему три обратных провода, питающие фазы приемника, заменены одним общим проводом.

Такое соединение фаз генератора или приемника назы-

вается соединением в звезду с нулевым проводом. Общие точки O_r и O_n , в которых сходятся концы трех фаз, называются нулевыми точками, а общий провод, соединяющий нулевые точки, — нулевым проводом или нулевой фазой. Остальные три провода называются фазовыми, или линейными проводами, или просто фазами (с нумерацией, соответствующей нумерации фаз генератора).

При соединении фаз генератора в звезду в нулевой точке должны сходиться либо начала, либо концы всех трех фаз; только при таком условии угол сдвига фаз между токами будет составлять 120° . Стоит только одну из фаз генератора, например вторую (рис. 158), присоединить к нулевой точке неправильно (началом вместо конца), как направления мгновенных токов в соответствующей фазе приемника изменятся

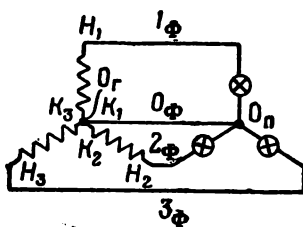


Рис. 158

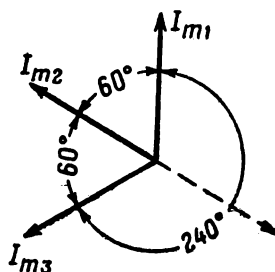


Рис. 159

на противоположные (из-за изменения знака потенциалов на концах фазы).

Изменение направлений мгновенных токов равносильно повороту вектора тока второй фазы на 180° от его нормального положения (рис. 156, б), поэтому векторная диаграмма токов всех трех фаз при неправильно подсоединенной второй фазе генератора имеет вид, показанный на рис. 159. Из диаграммы видно, что неправильное подсоединение одной из фаз генератора к нулевой точке, действительно, нарушает нормальный угол сдвига фаз (120°) между токами трехфазной системы.

При соединении фаз приемников указанного правила необходимо придерживаться только в отношении электрических двигателей, у которых фазы сдвинуты началами и концами на угол в 120° . Для осветительных же приемников понятия «начала» и «концы» фаз не имеют смысла (лампы могут быть расположены в пространстве как угодно одна относительно другой), поэтому при соединении таких приемников в звезду достаточно свести в нулевую точку по одному выводу (или концу провода) от каждой лампы или группы ламп, соединенных параллельно.

Система, состоящая из генератора и четырех проводов для питания неравномерной нагрузки, называется электрически

связанной четырехпроводной системой трехфазного тока. Распределение мгновенных токов в такой системе можно объяснить следующим образом.

Пусть в первой фазе приемника включены параллельно две одинаковые лампы (рис. 160, а), а во второй и третьей фазах — только по одной такой же лампе. При таком количестве ламп в фазах максимальный ток в первой фазе вдвое больше максимальных токов в других двух фазах, т. е.

$$I_{m2} = I_{m3} = \frac{I_{m1}}{2}.$$

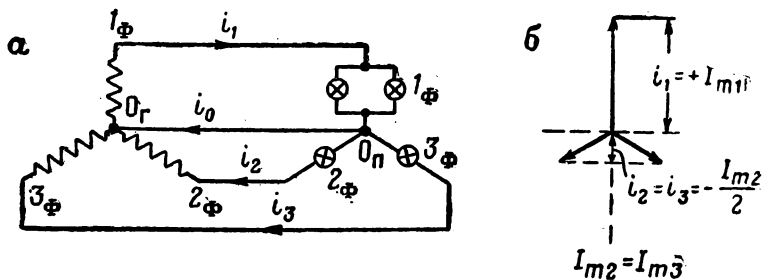


Рис. 160

Векторная диаграмма токов изображена на рис. 160, б. Пользуясь диаграммой, определим мгновенные значения токов в фазах для некоторого момента времени по проекциям векторов на вертикальную ось. В положении векторов, изображенном на рис. 160, б, мгновенные значения токов

$$\begin{aligned} i_1 &= +I_{m1}; \quad i_2 = i_3 = I_{m2} \sin(-30^\circ) = -\frac{I_{m2}}{2} = \\ &= -\frac{I_{m3}}{2} = -\frac{I_{m1}}{4}. \end{aligned}$$

Условимся, что при положительных значениях мгновенных токов в фазах эти токи по линейным проводам идут от генератора к приемнику, а при отрицательных значениях, наоборот, от приемника к генератору. При таком условии найденные нами мгновенные токи будут направлены в линейных проводах системы так, как показано стрелками на рис. 160, а.

Физически это означает, что в данный момент времени ток первой фазы ($i_1 = +I_{m1}$) подходит к нулевой точке O_n , в которой разветвляется и частично отходит от нее по второй и третьей фазам (токи $i_2 = i_3 = -\frac{I_{m1}}{4}$), остальная же часть тока ($I_{m1} - 2\frac{I_{m1}}{4} = \frac{I_{m1}}{2}$) отходит от нулевой точки по нулевому проводу (ток $i_0 = \frac{I_{m1}}{2}$).

Таким образом, благодаря сдвигу фаз между токами в 120° , а также благодаря наличию электрически связанной системы мгновенные значения токов в фазах как бы дополняют или компенсируют друг друга вследствие совместного действия электродвижущих сил генератора и лишь нескомпенсированная часть тока ($i_0 = \frac{I_{m1}}{2}$) наиболее нагруженной фазы отводится от приемника по нулевому проводу. Изменяя положения векторов и находя мгновенные токи в фазах, мы можем получить аналогичное распределение токов в системе для любого момента времени.

Наличие тока в нулевом проводе объясняется тем, что этот провод является **общим обратным** проводом для всех трех токов, которые проходят по линейным проводам от фаз генератора (нулевой провод заменяет собой обратные провода для фазных токов, как это видно из рис. 156, а). Таким образом, в нулевом проводе проходит некоторый ток I_{m0} , являющийся геометрической суммой фазовых токов I_{m1} , I_{m2} и I_{m3} , поэтому на основе первого правила Кирхгофа можно написать

$$\bar{I}_{m0} = \bar{I}_{m1} + \bar{I}_{m2} + \bar{I}_{m3},$$

или в действующих значениях

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3.$$

Это равенство и служит для определения величины действующего тока в нулевой фазе. На рис. 161 показано геометрическое сложение векторов для рассматриваемого случая.

Неравномерность нагрузки в фазах приемников на практике не превышает 30%, поэтому сечение нулевого провода берут вдвое меньше сечения линейных проводов (в рассмотренном случае неравномерность нагрузки в фазах составляла 100%).

При обрыве нулевого провода его ток I_0 устремляется в менее нагруженные фазы, что может привести к перегоранию приемников, включенных в эти фазы. Во избежание порчи приемников в нулевой провод на главном щите не разрешается ставить плавкий предохранитель.

Теперь рассмотрим трехпроводную систему, применяемую для питания равномерной нагрузки.

Схема соединения фаз генератора и двигателя в звезду представлена на рис. 162. От схемы четырехпроводной системы она отличается только отсутствием нулевого провода, который оказывается ненужным, так как вследствие равенства максимальных

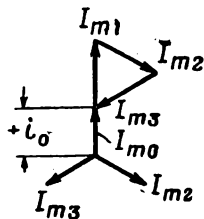


Рис. 161

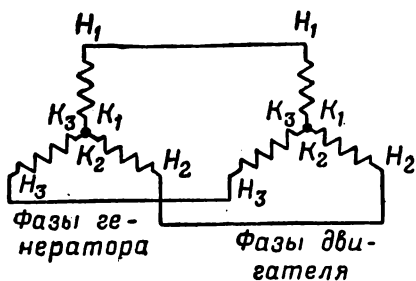


Рис. 162

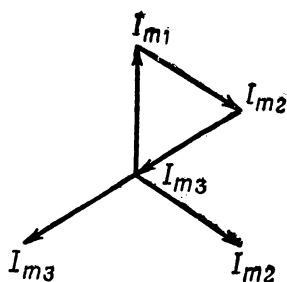


Рис. 163

токов в фазах при равномерной нагрузке их геометрическая сумма равна нулю (рис. 163). Мгновенные токи в фазах в любой момент времени лишь дополняют друг друга и не требуют нулевого провода (в этом можно убедиться, найдя мгновенные токи по проекциям векторов).

Схема другой трехпроводной системы, в которой фазы генератора и приемника соединены в треугольник, изображена на рис. 164. Из схемы видно, что для соединения фаз генератора или двигателя в треугольник необходимо конец первой фазы соединить с началом второй, конец второй фазы — с началом третьей, а конец третьей фазы — с началом первой. Таким образом обмотки генератора при наличии в них электродвижущих сил соединяются накоротко в замкнутый контур. Однако в этом нет никакой опасности, так как благодаря сдвигу по фазе между электродвижущими силами на 120° их геометрическая сумма равна нулю (рис. 165) и, следовательно, тока в контуре быть не может.

Линейные провода, соединяющие генератор с приемником (двигателем), позволяют каждой фазе генератора питать соответствующую фазу приемника, причем по каждому линейному проводу в соответствии с первым правилом Кирхгофа проходит сумма мгновенных токов двух смежных фаз, соединенных с этим проводом (рис. 164). Вследствие того что

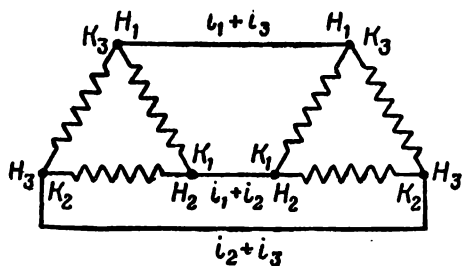


Рис. 164

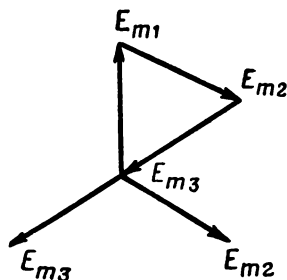


Рис. 165

в каждой из трех точек K_1H_2 ; K_2H_3 ; K_3H_1 , к которым присоединены линейные провода, сходятся начало и конец двух фаз генератора, угол сдвига фаз между соответствующими токами в линейных проводах получается не 120° , а 60° .

В самом деле, каждые две фазы в треугольнике можно рассматривать как соединенные в неполную звезду (рис. 166), в которой одна из фаз (например, вторая) к нулевой точке присоединена неправильно (началом H_2 вместо конца K_2). Однако выше отмечалось, что в случае неправильного подсоединения фазы к нулевой точке вектор тока этой фазы должен быть повернут на 180° относительно своего нормального положения на векторной диаграмме.

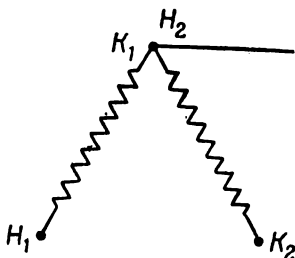


Рис. 166

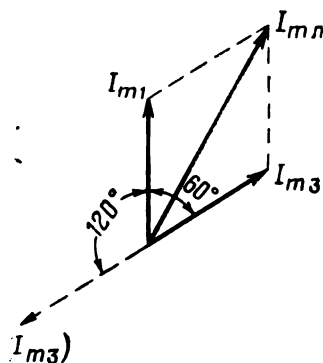


Рис. 167

Применив это правило хотя бы в отношении третьей фазы генератора (рис. 164), векторную диаграмму для токов I_{m1} и I_{m3} , проходящих по верхнему линейному проводу, можем изобразить так, как показано на рис. 167. Геометрическая сумма векторов I_{m1} и I_{m3} дает вектор $I_{мл}$ максимального значения тока в линейном проводе.

Вследствие равномерной нагрузки ($I_{m1} = I_{m2} = I_{m3}$) максимальные токи во всех линейных проводах получаются одинаковыми.

Таковы схемы соединения фаз генераторов и приемников при равномерной нагрузке. Нужно заметить, что в трехпроводной системе необязательно, чтобы фазы генератора и приемника были соединены одинаково, т. е. либо в звезду, либо в треугольник. Фазы генератора, как правило, соединяются в звезду (что дает возможность одновременно питать и осветительную нагрузку путем использования нулевого провода), фазы же двигателей в зависимости от величины номинального напряжения этих фаз могут соединяться как в звезду, так и в треугольник.

§ 80. ЛИНЕЙНЫЕ И ФАЗОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ И СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ НИМИ

При трехфазном токе необходимо различать фазовые и линейные токи и напряжения. Ознакомимся с этими величинами и установим соотношения между ними при различных

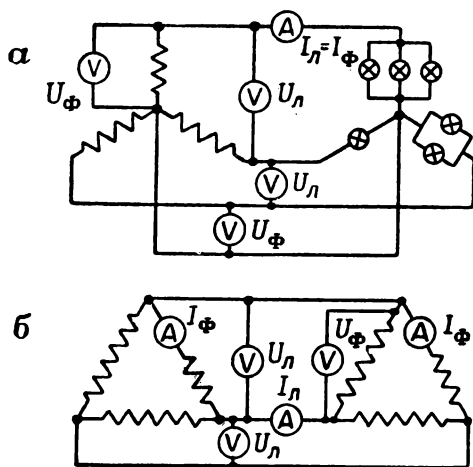


Рис. 168

рассмотренных нами соединений фаз генераторов и приемников.

Фазовым напряжением U_ϕ называется напряжение, которое поддерживается на зажимах фазы генератора или приемника, а также между нулевыми и одним из линейных проводов в случае соединения фаз в звезду с нулевым проводом.

Линейным (между-фазным) напряжением $U_\text{л}$ называется напряжение, поддерживаемое между двумя любыми линейными проводами

как в трехпроводной, так и в четырехпроводной системе.

Фазовым током называется ток I_ϕ , проходящий по фазе генератора или приемника, а **линейным током** — ток $I_\text{л}$, проходящий по линейному проводу.

Включение измерительных приборов (вольтметров и амперметров) для измерения действующих значений фазовых и линейных токов и напряжений показано на рис. 168.

Фазовое напряжение, измеряемое у генератора, всегда имеет несколько большее значение, чем у приемника, на величину падения напряжения в проводах. То же самое можно сказать и о величине линейного напряжения (чем ближе вольтметр подключен к генератору, тем он показывает больше). На практике падение напряжения в проводах не превышает 3% величины фазового или линейного напряжения, поэтому разница в показаниях вольтметров, измеряющих одноименные напряжения у генератора и приемника, незначительна.

Из рис. 168 видно, что при соединении фаз в звезду и в звезду с нулевым проводом линейный и фазовый токи равны между собой ($I_\text{л} = I_\phi$), а линейное напряжение больше фазового, так как оно создается двумя фазами генератора. При соединении фаз в треугольник, наоборот, линейное и фазовое

напряжения равны между собой ($U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$), линейный же ток больше фазового, так как является результатом сложения токов двух соседних фаз.

Соотношения между линейным и фазовым напряжениями при соединении в звезду, а также между линейным и фазовым токами при соединении в треугольник устанавливаются следующим образом.

Если нулевую точку O_r (рис. 169) принять за точку с нулевым потенциалом, то мгновенные значения фазовых напряжений в обмотках генератора ($u_{\phi 1}$, $u_{\phi 2}$ и $u_{\phi 3}$) будут представлять собой соответственно мгновенные значения потенциалов в точках H_1 , H_2 и H_3 , являющихся вторыми зажимами этих обмоток. Вольтметр, присоединенный к зажимам первой

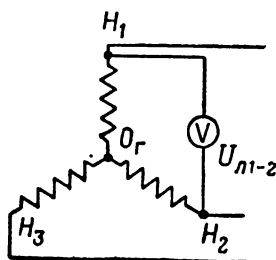


Рис. 169

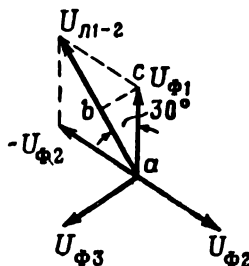


Рис. 170

и второй фаз, измеряет линейное напряжение или разность потенциалов между точками H_1 и H_2 , поэтому для мгновенных значений линейного напряжения можно написать

$$u_{\text{л}1-2} = u_{\phi 1} - u_{\phi 2},$$

или

$$u_{\text{л}1-2} = u_{\phi 1} + (-u_{\phi 2}).$$

Для перехода к действующим значениям последнее равенство следует написать в векторной форме

$$\bar{U}_{\text{л}1-2} = \bar{U}_{\phi 1} + (-\bar{U}_{\phi 2}).$$

Равенство означает, что для получения вектора линейного напряжения необходимо сложить геометрически вектор напряжения первой фазы с вектором напряжения второй фазы, взяв его обратного направления (рис. 170).

Из прямоугольного треугольника abc находим

$$ab = \frac{U_{\text{л}1-2}}{2} = U_{\phi 1} \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\phi 1},$$

отсюда

$$U_{\text{л}1-2} = \sqrt{3} U_{\phi 1}.$$

Благодаря равенству фазовых напряжений и углу сдвига фаз между ними в 120° все три линейных напряжения также равны между собой, поэтому для любого линейного напряжения можно написать

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}} = 1,73 U_{\text{ф}}. \quad (109)$$

Соотношение между линейным и фазовым токами при соединении в треугольник было уже установлено в предыдущем параграфе. Там мы пришли к выводу, что вектор линейного тока представляет собой геометрическую сумму векторов двух фазовых токов, сдвинутых по фазе на угол в 60° , как показано на рис. 167. Используя этот рисунок, мы таким же путем, как и для линейного напряжения (рис. 170), можем найти линейный ток

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}} = 1,73 I_{\text{ф}}. \quad (110)$$

Таким образом, между линейным и фазовым напряжениями при соединении в звезду, а также между соответствующими токами при соединении в треугольник существуют одинаковые соотношения.

На практике пользуются обычно линейными значениями токов и напряжений, так как к линейным проводам всегда можно подсоединить измерительные приборы. Фазовые значения измерять менее удобно, но в этом нет необходимости, так как их всегда можно вычислить по формулам (109) и (110) при наличии линейных значений.

В городских сетях трехфазного тока линейное напряжение составляет 220 в. Чтобы питать таким напряжением электрические лампы и нагревательные приборы, рассчитанные на 127 в, их нужно соединять в звезду с нулевым проводом. В этом случае приемники получают фазовое напряжение, величина которого определяется из соотношения $U_{\text{л}} = 1,73 U_{\text{ф}}$, откуда

$$U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{1,73} = \frac{220}{1,73} = 127 \text{ в}.$$

§ 81. МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА И ЕЕ ИЗМЕРЕНИЕ

Независимо от способа соединения фаз мощность каждой фазы генератора или приемника может быть вычислена по формуле

$$P_{\text{ф}} = U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi_{\text{ф}},$$

где $U_{\text{ф}}$ и $I_{\text{ф}}$ — фазовые значения тока и напряжения для соответствующей фазы;

$\varphi_{\text{ф}}$ — угол сдвига фаз между фазовым током и фазовым напряжением.

Для генератора эта мощность — полезная, а для приемника — потребляемая. Чтобы получить полную мощность генератора (или приемника), необходимо сложить мощности всех трех фаз:

$$P = P_{\phi 1} + P_{\phi 2} + P_{\phi 3}, \quad (111)$$

где $P_{\phi 1}$, $P_{\phi 2}$, $P_{\phi 3}$ — мощности отдельных фаз.

При равномерной нагрузке мощность во всех трех фазах получается одинаковой, поэтому

$$P = 3P_{\phi},$$

или

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}. \quad (112)$$

Для удобства пользования формулой перейдем в ней к линейным значениям тока и напряжения.

При соединении фаз (генератора или приемника) в звезду для фазовых значений тока и напряжения можно написать

$$I_{\phi} = I_{\lambda}; \quad U_{\phi} = \frac{U_{\lambda}}{\sqrt{3}}.$$

Подставив эти значения в формулу (112), получим

$$P = \frac{3}{\sqrt{3}} U_{\lambda} I_{\lambda} \cos \varphi_{\phi},$$

или

$$P = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} \cos \varphi_{\phi}.$$

При соединении фаз в треугольник

$$U_{\phi} = U_{\lambda}; \quad I_{\phi} = \frac{I_{\lambda}}{\sqrt{3}}.$$

Подставив эти значения тока и напряжения в формулу (112), получим

$$P = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} \cos \varphi_{\phi}.$$

Таким образом, в случае равномерной нагрузки при соединении фаз как в звезду, так и в треугольник полная мощность трехфазного тока выражается формулой

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi, \quad (113)$$

где U и I — линейные значения тока и напряжения;

φ — угол сдвига фаз между фазовым током и фазовым напряжением (индексы л и ф при U , I и φ принято не ставить).

По этим формулам можно вычислять мощность трехфазного тока лишь в том случае, когда известны углы сдвига фаз φ между токами и напряжениями в соответствующих фазах. При неизвестных углах сдвига фаз мощность трехфазного

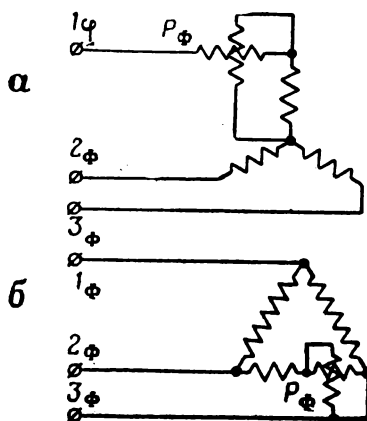


Рис. 171

тока можно измерить электро-динамическими ваттметрами.

Электрические схемы для измерения мощности трехфазного тока при равномерной нагрузке даны на рис. 171, а и рис. 171, б¹.

§ 82. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Трехфазный ток обладает очень важным свойством. При помощи трехфазного тока можно получать вращающееся магнитное поле, которое широко используется в электрических

двигателях и некоторых специальных устройствах. Благодаря этому свойству трехфазный ток и получил широкое распространение на практике, значительно сократив применение постоянного и однофазного токов.

Для получения вращающегося поля достаточно подвести трехфазный ток к статору трехфазного генератора или двигателя (статоры у них совершенно одинаковые), соединив предварительно фазы статора в звезду или в треугольник.

Пусть фазы статора соединены в звезду (рис. 172) и к ним подведен ток от генератора трехфазного тока. Будем указывать для отдельных моментов времени направления мгновен-

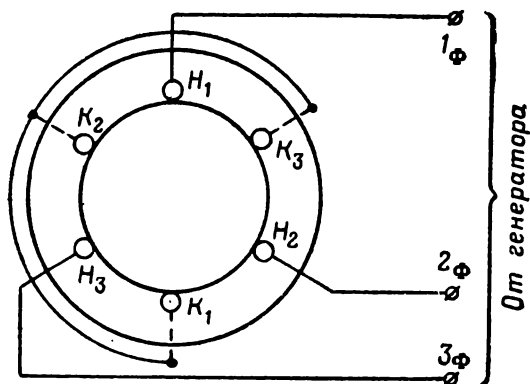


Рис. 172

¹ Показания ваттметров следует утроить для получения мощности трехфазного тока.

ных токов в фазах статора и в соответствии с этими направлениями изображать для каждого момента результирующее магнитное поле статора, т. е. поле, создаваемое всеми тремя токами.

Мгновенные токи в фазах статора можно определять по векторным диаграммам фазовых токов, поворачивая векторы каждый раз на угол в 30° (векторы можно поворачивать на любой угол, но для изображения поля их удобнее поворачивать на 30°). Условимся, что при положительном значении

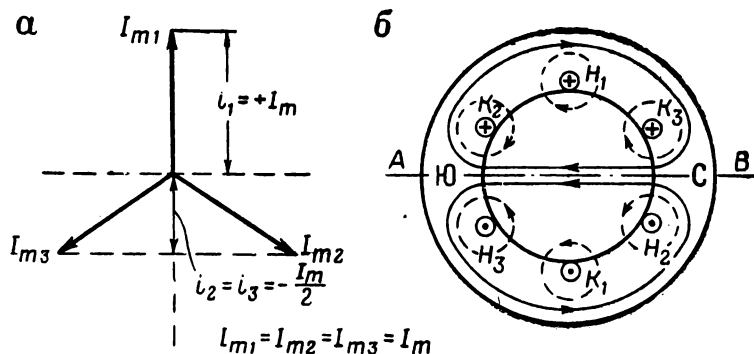


Рис. 173

мгновенного тока в фазе статора этот ток направлен от начала фазы к ее концу, поэтому у начала будем ставить крестик, а у конца точку. При отрицательном же значении тока его направление будем считать противоположным и, следовательно, у начала фазы ставить точку, а у конца крестик.

Начнем с момента времени, которому соответствует расположение векторов токов, указанное на диаграмме (рис. 173, а).

Благодаря равномерной нагрузке максимальные токи в фазах статора равны между собой, поэтому можно написать

$$I_{m1} = I_{m2} = I_{m3} = I_m.$$

При этом абсолютные и относительные значения мгновенных токов в фазах могут быть выражены следующим образом:

$$i_1 = +I_m; \quad i_2 = i_3 = -I_m \sin 30^\circ = -\frac{I_m}{2}.$$

Направления токов у начал и концов фаз статора указаны на рис. 173, б. Зная направления токов и пользуясь правилом буравчика, мы можем изобразить магнитные силовые линии полей, создаваемых токами (пунктирные линии на рис. 173, б), и по этим линиям установить силовые линии результиру-

шего магнитного поля (сплошные линии). Из рис. 173, б видно, что результирующее поле имеет два полюса и его ось AB в рассматриваемый момент времени расположена в пространстве горизонтально.

Теперь установим положение оси результирующего поля в другой момент времени, соответствующий новому положению векторов, после поворота их на 30° (рис. 174, а). Мгновенные значения токов в фазах статора для этого момента времени будут

$$i_1 = +0,86 I_m; \quad i_2 = 0; \quad i_3 = -0,86 I_m.$$

Направления мгновенных значений токов в фазах статора указаны на рис. 174, б. Здесь же изображены магнитными силовыми линиями поля отдельных токов и результирующее поле. Из рисунка видно, что это поле своей осью действительно повернулось в пространстве на такой же угол, как и векторы токов. Такое магнитное поле, непрерывно изменяющее положение своей оси в пространстве, называется **вращающимся магнитным полем**.

Если внутри статора укрепить металлический цилиндр (ротор) с помощью вала и боковых крышек с шарикоподшипниками, то в этом цилиндре от пересечения его силовыми линиями

вращающегося поля возникнут вихревые токи. Взаимодействуя с полем, токи вызовут вращение цилиндра. В этом и заключается использование вращающегося магнитного поля в электрических двигателях.

Основной расчетной величиной, определяющей силовые свойства вращающегося поля, является его магнитный поток Φ . Под магнитным потоком в данном случае следует понимать магнитные силовые линии, которые проходят через поперечное сечение одного из полюсов вращающегося магнитного поля.

Этот магнитный поток возникает в результате сложения мгновенных магнитных потоков всех трех фаз статора.

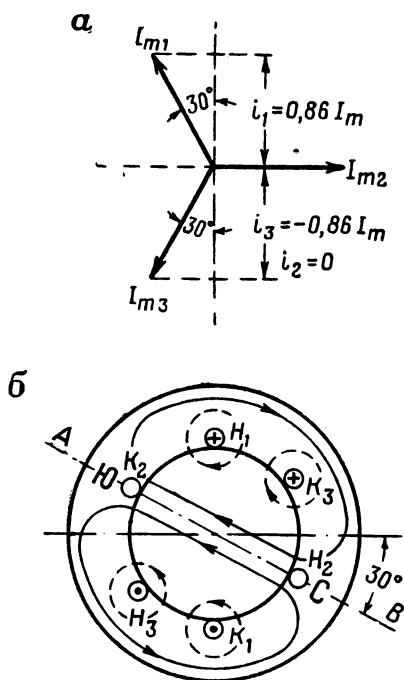


Рис. 174

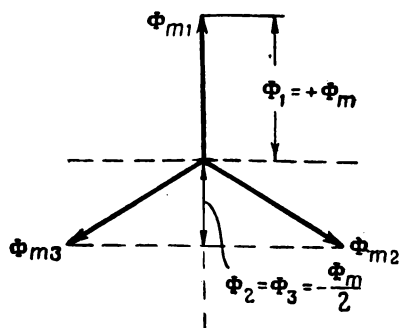


Рис. 175

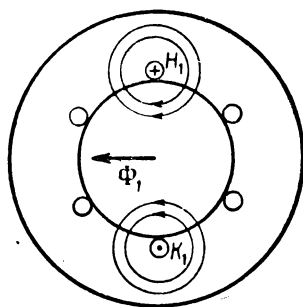


Рис. 176

Чем сильнее магнитный поток, тем сильнее получается и магнитное поле, т. е. тем большую работу оно может совершить в двигателе.

Одна из особенностей магнитного потока заключается в том, что он с течением времени не изменяет своей величины и с максимальным потоком Φ_m любой из фаз связан постоянной зависимостью

$$\Phi = 1,5\Phi_m. \quad (114)$$

Эту зависимость нетрудно получить, если мгновенные потоки всех трех фаз изобразить векторами, а затем сложить их геометрически.

Числовое значение мгновенных потоков можно определить по векторной диаграмме, изображенной на рис. 175. На этой диаграмме векторами обозначены максимальные магнитные потоки, сцепленные с фазами статора при максимальных значениях токов в них. Благодаря сдвигу по фазе между токами в 120° магнитные потоки, создаваемые этими токами, сдвинуты на такой же угол. По величине максимальные потоки равны между собой вследствие равенства максимальных токов в фазах.

Для некоторого момента времени, соответствующего положению векторов на рис. 175, абсолютные значения мгновенных потоков отдельных фаз статора определяются равенствами:

$$\Phi_1 = \Phi_m; \quad \Phi_2 = \Phi_3 = \frac{\Phi_m}{2},$$

где Φ_m — максимальное значение магнитного потока любой фазы статора.

На чертеже вектор мгновенного потока нужно располагать так, чтобы он совпадал с геометрической осью фазы статора и имел одинаковое направление с магнитными силовыми линиями поля, создаваемого током этой фазы, как это показана

но на рис. 176 для мгновенного потока $\Phi_1 = \Phi_m$, сцепленного в рассматриваемый момент времени с первой фазой статора.

Из рисунка видно, что вектор потока совпадает с геометрической осью фазы, которую следует рассматривать как катушку. Для правильного расположения вектора мгновенного потока на чертеже в фазе должно быть предварительно указано направление мгновенного тока (по векторной диаграмме токов).

Векторы всех трех мгновенных потоков, найденных по векторной диаграмме, изображены на рис. 177, а. Сложив эти векторы геометрически, получим вектор магнитного потока вращающегося поля.

Из построений, сделанных на рис. 177, б, видно, что числовое значение магнитного потока определяется зависимостью

$$\Phi = 1,5\Phi_m.$$

Сложив аналогично мгновенные потоки фаз для других моментов времени, можно убедиться в том, что вектор магнитного потока вращающегося поля остается неизменным. Это свойство магнитного поля очень ценно, так как оно обеспечивает равномерное вращение электрического двигателя (благодаря постоянству сил взаимодействия между вихревыми токами в роторе и магнитным потоком).

Для упрощения чертежей вращающееся магнитное поле изображают обычно одним вектором магнитного потока (рис. 178), считая, что этот вектор вращается в пространстве с такой же скоростью, как и поле.

Теперь выясним от чего зависит скорость вращения поля, или количество его оборотов (n) в минуту.

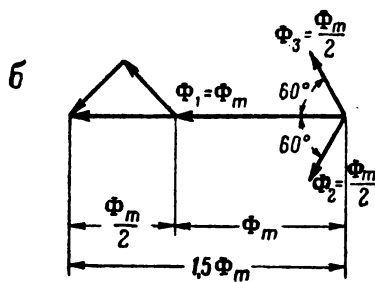
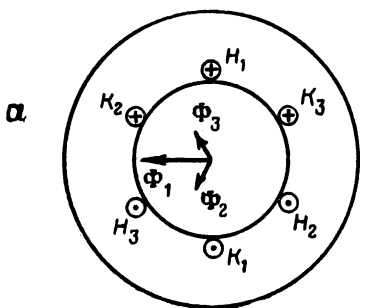


Рис. 177

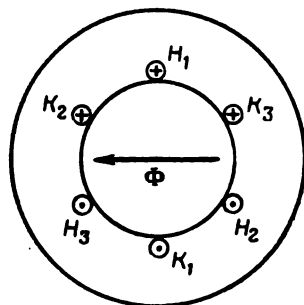


Рис. 178

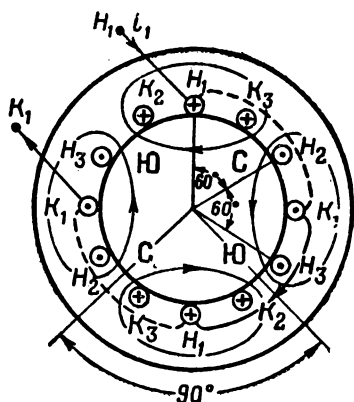


Рис. 179

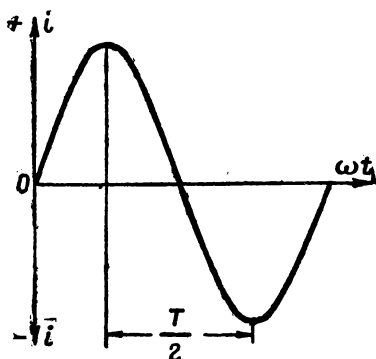


Рис. 180

Поворот магнитного поля на такой же угол, на какой поворачиваются векторы токов (рис. 173, 174), свидетельствует о том, что поле и векторы вращаются с одинаковой скоростью. Это и позволяет установить число оборотов вращающегося поля.

Известно, что одному полному обороту вектора тока соответствует один период T , следовательно, вращающееся магнитное поле также совершает один оборот за период. При такой скорости вращения поля оно в секунду совершит f оборотов (так как в секунде f периодов), а в минуту $60 f$ оборотов.

Однако это справедливо только для двухполюсного поля. На практике же существуют статоры для создания поля, имеющего p пар полюсов.

На рис. 179 изображен статор для получения четырехполюсного поля. В этом статоре каждая фаза состоит из двух последовательно соединенных витков, у которых начала и концы имеют нумерацию фазы. Соединение витков одной фазы между собой показано только для первой фазы, чтобы не затемнять чертежа.

Для поворота четырехполюсного поля на 90° необходимо, чтобы направления токов во всех трех фазах статора изменились на противоположные, а абсолютные значения токов имели такую же величину, какую они имели до поворота поля на указанный угол. Только при таком условии полярность всех полюсов поля изменится на противоположную (т. е. с северной на южную и наоборот), а это и будет равносильно повороту поля на 90° .

Из рис. 180 видно, что при синусоидальном токе требуется полпериода для того, чтобы ток изменил свое направление на противоположное и достиг прежней величины (на рис. 180 — максимального значения).

Таким образом, четырехполюсное поле за полпериода поворачивается на 90° , а полный оборот совершает за два периода т. е. вращается вдвое медленнее, чем двухполюсное поле. У поля, имеющего p пар полюсов, скорость вращения в p раз меньше, чем у двухполюсного поля, поэтому формулу для определения числа оборотов вращающегося магнитного поля трехфазного тока в общем виде следует написать так:

$$n = \frac{60f}{p}, \quad (115)$$

где f — частота тока в герцах;

p — число пар полюсов, на которые рассчитаны обмотки статора (такое же количество полюсов будет иметь и вращающееся поле).

При наличии многополюсного вращающегося поля углы его поворота необходимо измерять уже не в геометрических, а в электрических градусах или радианах, считая при этом, что поворот поля на 360 электрических градусов совершается в течение одного периода.

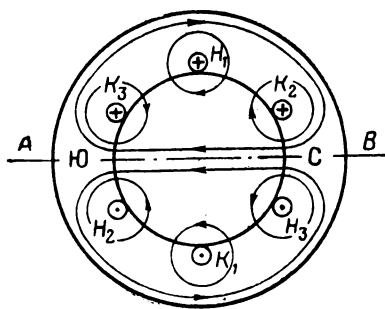
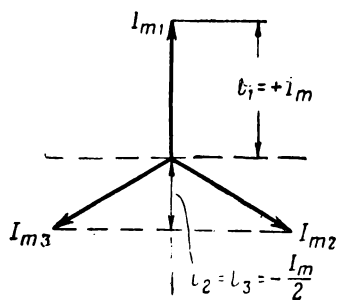
В статоре, предназначенном для получения многополюсного поля, начала и концы фаз также должны быть сдвинуты на 120 электрических градусов. У статора, изображенного на рис. 179, углу в 120 электрических градусов между началами фаз соответствует угол в 60 геометрических градусов.

Нам осталось установить, от чего зависит направление вращения магнитного поля, возникающего в статоре. Для этого обратимся к рис. 173, б и 174, б. Из рисунков видно, что поле вращается в том же направлении, в котором чередуются фазы статора своими началами или концами. В данном случае такое чередование фаз совпадает с направлением вращения часовой стрелки. В этом же направлении вращается и магнитное поле в статоре.

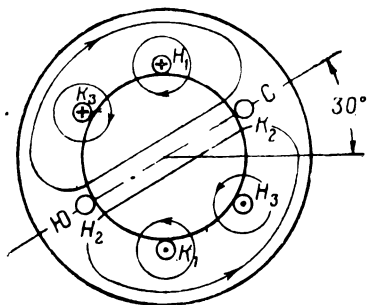
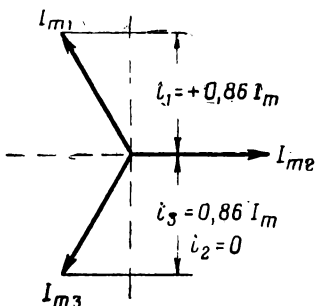
Направление чередования фаз в статоре задается источником трехфазного тока, который питает эти фазы. Пока статор не подсоединен к источнику, любую его фазу можно принять за первую и от нее нумеровать другие фазы в любом направлении. Однако стоит только статор подключить к источнику, как его фазы получат ту же нумерацию, что и фазы источника (рис. 172).

Опыт показывает, что если чередование фаз статора изменить на противоположное, то магнитное поле также начнет вращаться в обратную сторону. Изменение направления вращения поля называется его реверсированием.

В том, что поле изменяет направление своего вращения, можно убедиться из рис. 181, а, б, на которых чередование фаз у статора показано против вращения часовой стрелки. Два положения результирующего поля, изображенные на рисунках, установлены для тех же моментов времени, которые бра-



а



б

Рис. 181

лись в начале параграфа (рис. 173 и 174), и тем же самым путем, т. е. по направлению мгновенных токов в фазах статора.

Эти положения показывают, что при данном чередовании фаз поле действительно изменяет направление своего вращения на противоположное. Для изменения порядка чередования фаз в статоре достаточно поменять местами два любых линейных провода, питающих статор от источника трехфазного тока, как это показано на рис. 182.

Выводы.

1. Вращающееся магнитное поле возникает при прохождении трехфазного тока через статор трехфазной машины.

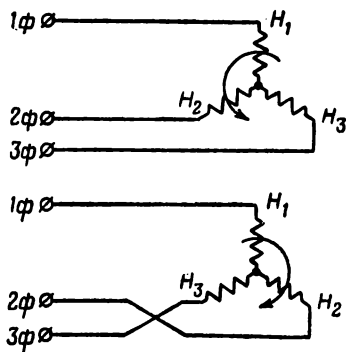


Рис. 182

2. Магнитный поток вращающегося поля не изменяет своей величины с течением времени и равен полуторному значению максимального потока одной фазы статора.

3. Обороты поля в минуту определяются формулой
$$n = \frac{60f}{P}.$$

4. Для реверсирования поля достаточно поменять местами два любых линейных провода, питающих статор.

§ 83. ВРАЩАЮЩИЕСЯ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ДВУХФАЗНОГО И ОДНОФАЗНОГО ТОКОВ

Вращающееся магнитное поле можно получить не только с помощью трехфазного тока. Двухфазный и однофазный токи также могут быть использованы для создания вращающихся магнитных полей, однако эти поля значительно слабее поля трехфазного тока (по магнитному потоку). Кроме того, для рационального использования поля однофазного тока требуется еще и дополнительная обмотка на статоре.

Рассмотрим вращающееся магнитное поле каждого из токов.

Двухфазным током называется система двух однофазных токов одинаковой частоты, сдвинутых по фазе на угол в 90° (рис. 183). На практике такую систему получают из однофазного тока с помощью конденсатора определенной емкости (§ 76).

Для создания вращающегося магнитного поля используют либо специальный двухфазный статор, фазы которого сдвинуты одна относительно другой на угол 90° , либо обычный трехфазный статор, для чего его фазы соединяют по особой схеме (см. ниже).

Двухфазный статор изображен на рис. 184, а. Для простоты каждая его фаза показана состоящей из одного витка.

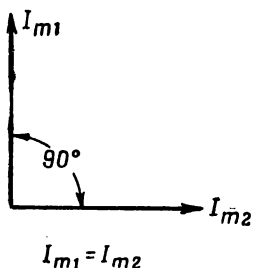


Рис. 183

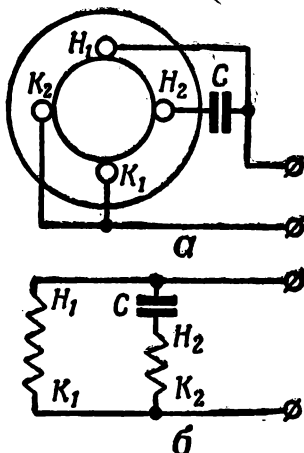


Рис. 184

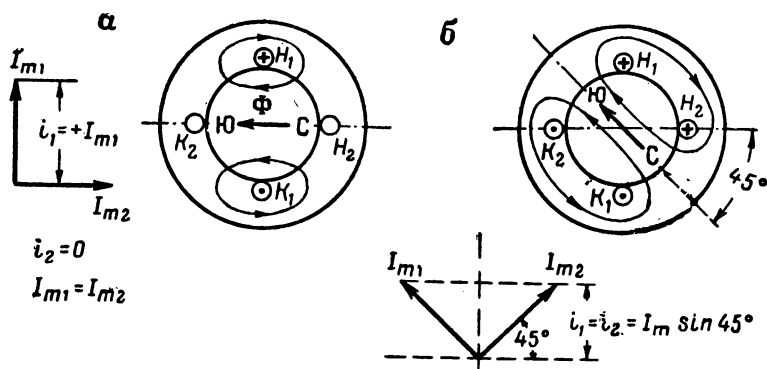


Рис. 185

Электрическая схема соединения фаз статора дана на рис. 184, б. Из рисунка видно, что последовательно с одной из фаз статора (второй) включен конденсатор C для получения угла сдвига фаз в 90° между токами обеих параллельно соединенных фаз. Емкость конденсатора подбирают такой, чтобы максимальные значения токов в фазах были одинаковы ($I_{m1} = I_{m2} = I_m$).

Пользуясь тем же приемом, который мы применяли при объяснении вращающегося магнитного поля трехфазного тока, можно убедиться в том, что двухфазный ток, проходя по фазам статора, создает в нем вращающееся поле. На рис. 185 изображены два положения поля для двух различных моментов времени. Из рисунка видно, что поле своей осью поворачивается на такой же угол, что и векторы токов. Следовательно, для определения числа оборотов поля двухфазного тока остается справедливой формула

$$n = \frac{60f}{p}.$$

Направление вращения поля совпадает с чередованием фаз в статоре, поэтому для реверсирования поля необходимо переключить выводы одной из фаз статора (а не провода, питающие статор).

Магнитный поток Φ поля двухфазного тока с течением времени также остается постоянным, но равным лишь максимальному значению магнитного потока одной фазы статора, т. е. $\Phi = \Phi_m$. Эта зависимость устанавливается так же, как и для потока магнитного поля трехфазного тока.

Таким образом, по магнитному потоку поле двухфазного тока в полтора раза слабее поля трехфазного тока (при одинаковых действующих значениях токов в фазах), и в этом его существенный недостаток.

Для создания вращающегося магнитного поля в трехфазном статоре фазы этого статора соединяют между собой так, как показано на рис. 186. Из рисунка видно, что в данном случае одну из фаз статора образуют две его фазы (первая и вторая), соединенные последовательно.

Таковы особенности вращающегося магнитного поля двухфазного тока и условия его получения. На практике к полю двухфазного тока прибегают в тех случаях, когда трехфазный ток по тем или иным соображениям не применяется.

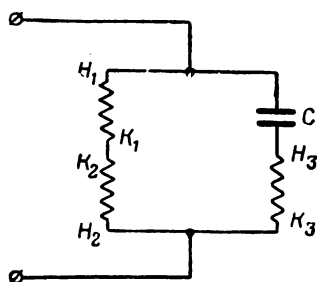


Рис. 186

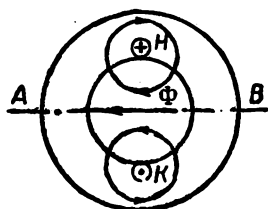


Рис. 187

Теперь рассмотрим вращающееся магнитное поле однофазного тока. На рис. 187 показан однофазный статор, имеющий только одну обмотку или фазу. Если через фазу пропустить однофазный ток, то в статоре появится пульсирующее магнитное поле, т. е. такое поле, у которого магнитный поток изменяется с течением времени как по величине, так и по направлению, однако ось поля AB сохраняет неизменное положение в пространстве.

Магнитный поток пульсирующего поля изменяется по синусоидальному закону (§ 71), поэтому его мгновенные значения могут быть определены по формуле.

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t.$$

Пульсирующее магнитное поле однофазного тока получается в результате сложения двух магнитных полей, которые вращаются в статоре в противоположные стороны, но с одинаковым числом оборотов. Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 обоих полей равны между собой по величине и связаны с максимальным магнитным потоком Φ_m пульсирующего поля следующим соотношением:

$$\Phi_1 = \Phi_2 = 0,5\Phi_m.$$

Из этого соотношения следует, что вращающееся магнитное поле однофазного тока еще слабее, чем поле двухфазного тока.

Возникновение в статоре пульсирующего магнитного поля в результате сложения двух вращающихся полей можно объяснить следующим образом.

Пусть векторы $\vec{\Phi}_1$ и $\vec{\Phi}_2$ магнитных потоков вращающихся полей занимают начальное положение в пространстве (рис. 188) по линии CD , но направлены в противоположные стороны. Если теперь вращать векторы около их общего начала O в противоположных направлениях, но с одинаковой угловой скоростью, то геометрическая сумма этих векторов при любом их положении будет давать вектор мгновенного магнитного потока пульсирующего поля:

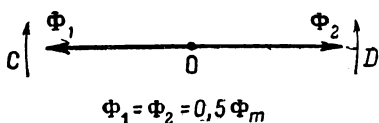


Рис. 188

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t.$$

Чтобы убедиться в этом, достаточно рассмотреть несколько положений векторов.

Первое положение: векторы потоков повернулись на 30° . Из рис. 189, а видно, что вектор $\vec{\Phi}$, представляющий геометрическую сумму рассматриваемых векторов, численно равен величине одного вектора (треугольник abc — равносторонний), т. е.

$$\Phi = \Phi_1 = \Phi_2 = \frac{\Phi_m}{2}.$$

Точно такое же значение магнитного потока можно получить по формуле $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, определяющей любое мгновенное значение магнитного потока пульсирующего поля. Действительно, подставив в эту формулу $\omega t = 30^\circ$, получим

$$\Phi = \Phi_m \sin 30^\circ = \frac{\Phi_m}{2}.$$

Одинаковые значения магнитных потоков в обоих случаях свидетельствуют о том, что пульсирующее поле возникает в результате сложения двух вращающихся полей.

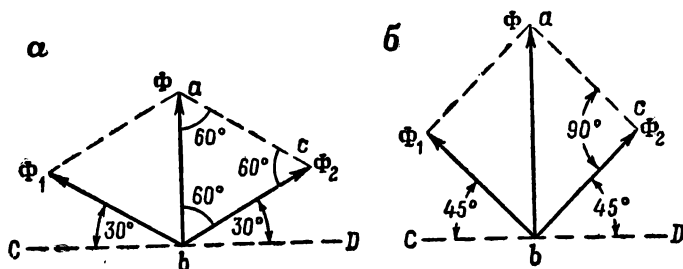


Рис. 189

Второе положение: векторы повернулись еще на 15° (рис. 189, б). При этом положении числовое значение вектора Φ (из прямоугольного треугольника abc) будет

$$\Phi = \sqrt{\left(\frac{\Phi_m}{2}\right)^2 + \left(\frac{\Phi_m}{2}\right)^2} = \sqrt{2 \left(\frac{\Phi_m}{2}\right)^2} = \frac{\sqrt{2}}{2} \Phi_m.$$

Подставив в формулу $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ значение $\omega t = 45^\circ$, получим

$$\Phi = \Phi_m \sin 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} \Phi_m.$$

Эта формула дает такой же результат, как и геометрическое сложение двух векторов Φ_1 и Φ_2 . Следовательно, математически можно доказать, что однофазный ток создает в статоре два вращающихся магнитных поля, которые при своем вращении образуют пульсирующее поле.

Из рассмотренных положений векторов можно сделать вывод, что магнитные поля один оборот совершают за период T , так как полный цикл изменений пульсирующего поля, изображенного на рис. 187, также происходит за период. Благодаря такой скорости вращения полей их обороты могут определяться по известной уже формуле.

$$n = \frac{60f}{p} \frac{\text{обороты}}{\text{минута}}.$$

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ VI

1. Что называется трехфазным током и каковы его преимущества перед однофазным током?
2. Как получается трехфазный ток на практике?
3. Что следует понимать под фазами генератора и приемника при трехфазном токе?
4. Что следует понимать под равномерной и неравномерной нагрузками для генератора трехфазного тока?
5. Каковы способы соединения фаз генераторов и приемников трехфазного тока?
6. Что называется четырехпроводной системой трехфазного тока и для какой нагрузки она применяется?
7. Каково значение нулевого провода в четырехпроводной системе?
8. Что называется трехпроводной системой трехфазного тока и для какой нагрузки она применяется?
9. Что называется линейными и фазовыми токами и напряжениями?
10. Каковы соотношения между линейными и фазовыми значениями токов и напряжений при соединении фаз (генератора или приемника) в звезду и в треугольник?

11. В чем удобство линейных значений токов и напряжений?
 12. По какой формуле определяется мощность трехфазного тока при равномерной нагрузке?
 13. Каковы условия получения вращающегося магнитного поля трехфазного тока?
 14. Как используется вращающееся поле в электрических двигателях?
 15. По какой формуле определяется число оборотов вращающегося поля?
 16. Как производится реверсирование вращающегося магнитного поля?
 17. Как получить вращающееся магнитное поле двухфазного тока?
 18. В чем особенность пульсирующего магнитного поля однофазного тока?
-

ГЛАВА VII

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

§ 84. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИБОРАХ

Электрическим измерительным прибором называется устройство, предназначенное для измерения в установленных единицах числового значения той или иной электрической величины (тока, напряжения, мощности и т. п.).

Впервые мысль о необходимости применения электрических измерительных приборов возникла у русского ученого М. В. Ломоносова. Вместе со своим другом физиком Г. В. Рихманом он в 1752 году создал первый в мире электрический измерительный прибор — «электрический указатель» для измерения потенциалов электрически заряженных тел.

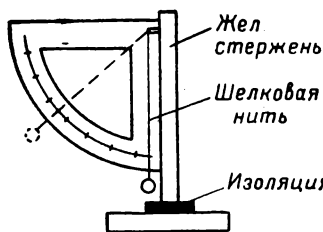


Рис. 190

Этот прибор (рис. 190) послужил прообразом современного электростатического вольтметра.

Работа прибора заключается в том, что в момент касания железным стержнем заряженного тела стержень и шарик заряжаются одноименным электричеством, поэтому шарик отклоняется от стержня на определенный угол, измеряемый по квадранту. Величина угла получается пропорциональной заряду тела, а следовательно, и его потенциалу, так как потенциал связан с зарядом также пропорциональной зависимостью (§ 8).

Большая заслуга в разработке электрических измерительных приборов принадлежит русскому инженеру М. О. Доливо-Добровольскому. Конструкции отдельных приборов, созданных Доливо-Добровольским, с небольшими изменениями применяются и в настоящее время.

В царской России, как известно, не было своей приборостроительной промышленности, если не считать сравнительно

небольшого полукустарного производства, поэтому изобретения русских ученых и инженеров не могли быть внедрены в практику.

Коренной перелом в приборостроении произошел у нас после Октябрьской революции. Уже к 1927 году наша молодая промышленность выпускала щитовые измерительные приборы почти всех систем. В 1936 году количество различных типов приборов достигло пятидесяти.

Такие темпы развития приборостроительной промышленности объясняются небывалым размахом электрификации нашей страны. Особенно показателен в этом отношении рост продукции приборостроительной промышленности в первую послевоенную пятилетку. За годы этой пятилетки продукция возросла в семь раз по сравнению с довоенным, 1940 годом.

В настоящее время наша страна обладает первоклассной приборостроительной промышленностью, которая выпускает самые разнообразные электрические измерительные приборы и полностью обеспечивает все возрастающие внутренние потребности страны. В данной главе рассматриваются устройство, свойства и принципы работы некоторых электрических измерительных приборов, наиболее распространенных на практике.

Классификация приборов по принципу действия и по роду измеряемой величины

По принципу действия существующие электрические измерительные приборы подразделяются на следующие системы: 1) магнитоэлектрическую, 2) электромагнитную, 3) электродинамическую, 4) тепловую, 5) термоэлектрическую, 6) вибрационную, 7) индукционную, 8) детекторную, 9) электростатическую, 10) электронную и 11) электрохимическую. Из всех этих систем нами будут рассмотрены только первые шесть.

В основу работы приборов каждой системы положено то или иное явление, вызываемое электрическим током. Явлением, используемым в приборе, как правило, и определяется название системы.

Кроме классификации по принципу действия, электрические измерительные приборы можно классифицировать по роду измеряемой ими электрической величины. По этому признаку приборы подразделяются:

- а) на амперметры, измеряющие величину тока;
- б) вольтметры, измеряющие электродвижущую силу и напряжение;
- в) ваттметры, измеряющие мощность электрического тока;
- г) омметры, измеряющие сопротивление проводников;
- д) частотомеры, измеряющие частоту переменного тока.

Классификация приборов по степени точности

Абсолютно точно измерить электрические величины с помощью приборов невозможно из-за целого ряда причин (конструктивное несовершенство самих приборов, влияние внешних факторов и т. п.), поэтому результаты измерений всегда получаются приближенными. Разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины называется абсолютной погрешностью или ошибкой данного прибора.

Погрешность прибора может быть как положительной, так и отрицательной. Если известна величина погрешности, то для получения истинного значения измеряемой величины положительную погрешность следует вычитать из показания прибора, а отрицательную — прибавить. Величина погрешности указывается в процентах от наибольшего значения шкалы прибора.

Согласно ГОСТ 1845-53 амперметры, вольтметры и ваттметры магнитоэлектрической, электромагнитной и электродинамической систем подразделяются на семь классов точности: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0. Номер каждого класса означает наибольшую допустимую погрешность прибора этого класса (в процентах). Приборы, не удовлетворяющие классу 4,0, считаются внеклассными.

Приборы первых двух классов называются также лабораторными, а пяти последних — техническими. Лабораторные приборы применяются для точных измерений, а также для выверки технических приборов. Технические приборы — самые распространенные, они используются для контроля за работой электрических станций, отдельных приемников электрической энергии, в учебных лабораториях и т. п.

Общие детали устройства приборов



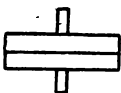







Независимо от принципа действия каждый электрический измерительный прибор состоит обычно из следующих частей: шкалы с делениями; подвижной системы с указательной стрелкой и успокоителем; пружин для создания противодействующего момента; неподвижной части; корректора для установки стрелки в нулевое положение; соединительных проводов, выводов и зажимов.





Приборы последних выпусков чаще всего монтируются в пластмассовом корпусе (реже в металлическом), имеющем окно со стеклом для отсчетов по шкале.

Условные знаки на шкале приборов

На лицевой стороне приборов, обычно на шкале, наносятся условные знаки, которые приводятся в табл. 10.

Условные обозначения, наносимые на шкалы электроизмерительных приборов для их характеристики

Условное обозначение	Пояснение к условному обозначению
	Прибор магнитоэлектрической системы
	" электромагнитной "
	" электродинамической "
	" термоэлектрической "
	" тепловой "
	" вибрационной "
	Класс точности прибора 2,5
	Прибор только для постоянного тока
	" " переменного "
	" для постоянного и переменного токов

Условное обозначение	Пояснение к условному обозначению
	Вертикальное положение шкалы прибора при работе
	Горизонтальное положение шкалы прибора при работе
	Положение шкалы прибора под углом 60° к горизонтальной плоскости
	Изоляция обмоток прибора испытана под напряжением 2 кВ
A	Амперметр
V	Вольтметр
mA	Миллиамперметр
mV	Милливольтметр
W	Ваттметр
Ω	Омметр

Кроме условных знаков, на шкале дается заводский номер прибора, его марка и год изготовления. Если приборы имеют дополнительные принадлежности, например, шунты, добавочные сопротивления, термоэлементы, то на шкале прибора делается соответствующая надпись: «С наруж. шунтом», «С отд. доб. сопротивлением» и т. п.

Требования, предъявляемые к приборам

Каждый электрический измерительный прибор по возможности должен удовлетворять следующим требованиям:

1) допускать непосредственный отсчет измеряемой величины по шкале в практических единицах (для удобства и быстроты измерений);

- 2) иметь равномерную шкалу (для удобства отсчетов);
- 3) давать достаточно точные результаты измерения;
- 4) быть чувствительным, т. е. реагировать на малые измеряемые величины;
- 5) мало зависеть в своих показаниях от внешних факторов (температуры воздуха, внешних магнитных полей);
- 6) обладать быстрым успокоением подвижной системы;
- 7) выдерживать перегрузки (не портиться от кратковременных перегрузок);
- 8) обладать простотой конструкции, дешевизной и надежностью действия;
- 9) потреблять незначительную мощность.

Однако не все измерительные приборы в одинаковой мере удовлетворяют перечисленным требованиям. Отдельно взятый прибор той или иной системы удовлетворяет лишь некоторым из них и при этом в различной степени. Этим объясняется большое многообразие измерительных приборов, применяемых на практике.

§ 85. ПРИБОРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Устройство и принцип действия приборов

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита с током, проходящим по подвижной обмотке. Устройство магнитоэлектрического прибора показано на рис. 191.

Неподвижную часть прибора составляют постоянный подковообразный магнит с наконечниками и железный цилиндр. С помощью цилиндра и наконечников создается очень сильное магнитное поле в воздушном зазоре прибора и, кроме того, достигается равномерное и радиальное распределение магнитных силовых линий в этом зазоре (рис. 192):

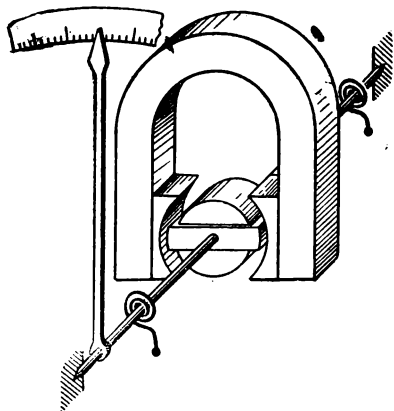


Рис. 191

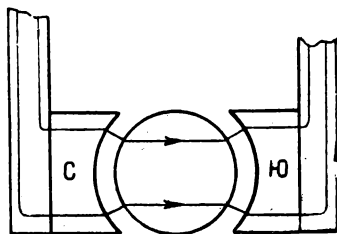


Рис. 192

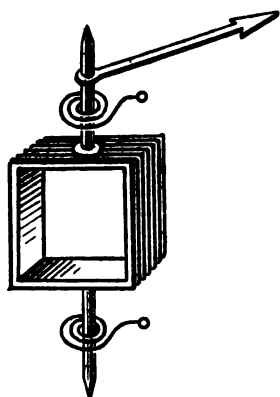


Рис. 193

Подвижная система прибора состоит из алюминиевой рамки (каркаса) и наложенной на нее обмотки из тонкой изолированной медной проволоки (рис. 193). Концы обмотки соединены со спиральными пружинками, изолированно укрепленными на стальных полуосях рамки. Свободными концами пружинки прикреплены к двум неподвижным проволокам, подводящим ток к обмотке, и при работе прибора служат токоведущими частями. С помощью одного из подводящих проводников можно изменять натяжение передней пружинки (расположенной с лицевой стороны), устанавливая, в случае необходимости, стрелку в нулевое положение.

Пружинки изготавливаются из фосфористой бронзы, которая не изменяет жесткости при нагревании до некоторой температуры, и предназначены для создания противодействующего момента в приборе, а также для возвращения подвижной системы в первоначальное (нулевое) положение после выключения тока из обмотки.

На одной из полуосей рамки укреплена легкая алюминиевая стрелка, перемещающаяся по шкале прибора. С помощью полуосей подвижная система удерживается в подпятниках. Успокоение подвижной системы достигается тормозящим действием вихревых токов, которые индуцируются в алюминиевой рамке при ее резких поворотах в момент включения тока в обмотку. При отсутствии успокаивающего устройства в приборе его подвижная система очень долго колеблется (вследствие наличия пружин), прежде чем остановиться в нужном положении.

Шкала технических приборов вычерчивается на плотной бумаге и наклеивается на металлическое основание. У большинства приборов последних выпусков шкала наносится фотохимическим способом непосредственно на металл. Такие шкалы получаются более четкими и долговечными.

Все части прибора монтируются в штампованном металлическом или пластмассовом корпусе.

Магнитоэлектрические приборы, имеющие рассмотренное устройство, могут изготавливаться в виде амперметров, миллиамперметров, микроамперметров, а также вольтметров и милливольтметров. Конструктивно все они отличаются один от другого незначительно. Так, для повышения чувствительности у микроамперметров постоянные магниты изготовляют из никель-алюминиевого сплава, имеющего значительно более вы-

сокие магнитные свойства по сравнению с хромистой сталью, применяемой для вольтметров и амперметров; кроме того, обмотка микроамперметров выполняется без каркаса (для облегчения) и имеет большое количество витков (до 600) из очень тонкой изолированной проволоки (толщиной 0,03 мм). Витки обмотки склеивают шеллаком. Для успокоения подвижной системы прибора к внутренней стороне обмотки приклеивают (шеллаком) замкнутый виток из тонкой алюминиевой фольги (в витке возникают вихревые токи); полуоси обмотки также приклеивают к ней шеллаком.

При такой конструкции прибор имеет высокую чувствительность; он может реагировать на одну миллионную долю ампера ($1 \cdot 10^{-6}$ а).

Работа магнитоэлектрического прибора

При прохождении тока по обмотке прибора на ее активные стороны начинают действовать одинаковые силы F , величина которых может быть определена по формуле

$$F = BIl,$$

где B — постоянная по величине магнитная индукция в воздушном зазоре прибора в $\frac{\text{вб-сек}}{\text{м}^2}$;

I — величина тока, проходящего по обмотке, в амперах;

l — длина активной стороны обмотки в метрах.

На рис. 194, а обмотка условно показана состоящей из одного витка. Силы, действующие на активные стороны витка, по правилу левой руки направлены перпендикулярно к плоскости чертежа, поэтому на рисунке не изображены. Для большей наглядности виток показан в разрезе (рис. 194, б). Из рисунка видно, что силы, действующие на виток, образуют пару сил, момент которой определяется формулой

$$M = Fd,$$

где d — плечо пары сил, численно равное ширине витка.

Этот момент в приборе называется его вращающим моментом ($M_{\text{вр}}$).

Благодаря радиальному распределению магнитных силовых линий в воздушном зазоре прибора (рис. 195) силы F

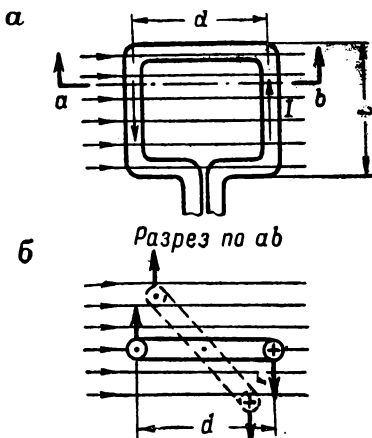


Рис. 194

при любом положении витка направлены перпендикулярно к его плоскости, вследствие чего плечо пары сил в приборе остается неизменным (при прямолинейном поле плечо изменяется, как видно из рис. 194, б).

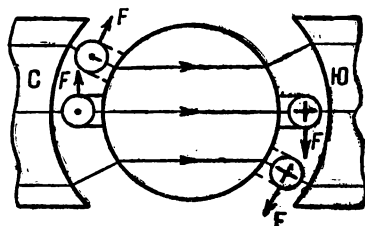


Рис. 195

Подставив в формулу вращающего момента значение силы F , получим

$$M_{\text{вр}} = BldI,$$

или

$$M_{\text{вр}} = c_1 I,$$

где $c_1 = Bld$ — некоторый постоянный коэффициент для дан-

ного прибора (как произведение постоянных сомножителей).

Под действием вращающего момента подвижная система начинает поворачиваться вокруг своей оси и скручивать пружинки. Скручиванию пружинкам противодействует их жесткость, которая проявляется в виде так называемого противодействующего момента пружинки $M_{\text{пр}}$. Величина этого момента определяется формулой

$$M_{\text{пр}} = c_2 \alpha,$$

где α — угол поворота подвижной системы из начального положения или угол, на который отклоняется указательная стрелка по шкале;

c_2 — постоянный коэффициент, характеризующий жесткость пружинки.

При успокоении подвижной системы вращающий момент прибора уравнивается противодействующим моментом, поэтому

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}},$$

или

$$c_1 I = c_2 \alpha.$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{c_1}{c_2} I,$$

или

$$\alpha = cI, \quad (116)$$

где $c = \frac{c_1}{c_2}$.

Полученное нами равенство означает, что шкала у магнитоэлектрических приборов равномерная (угол поворота стрелки пропорционален числовому значению измеряемой величины), и в этом их преимущество перед приборами других систем,

Если изменить направление тока в обмотке прибора, то силы, действующие на ее активные стороны, также изменят направление на противоположное. В результате указательная стрелка станет отклоняться в обратную сторону, и это исключит возможность измерения электрической величины прибором. Свойство магнитоэлектрических приборов измерять величины только при определенном направлении тока в их обмотках называется полярностью.

Из-за полярности магнитоэлектрические приборы нельзя использовать для измерения переменного тока, непосредственно включая их в цепь. В этом, конечно, недостаток приборов. Однако полярность приборов ценна в другом отношении: она позволяет определять плюс (т. е. положительно заряженный зажим) источников постоянного тока, что очень часто бывает необходимо на практике.

У выпускаемых нашей промышленностью приборов их собственная полярность (выводов) помечается знаком «+».

Свойства магнитоэлектрических приборов

Необходимо отметить следующие положительные свойства магнитоэлектрических приборов:

- 1) равномерность шкалы на всей ее длине;
- 2) высокая чувствительность (самые чувствительные из всех измерительных приборов);
- 3) большая точность измерений (некоторые специальные приборы имеют точность выше первого класса);
- 4) незначительная зависимость работы приборов от внешних магнитных полей и температуры воздуха (собственное поле приборов сильное, жесткость пружинок почти не изменяется в пределах допустимых температур);
- 5) хорошая апериодичность, т. е. быстрое успокоение подвижной системы;
- 6) незначительная величина потребляемой мощности (амперметры потребляют до 1,5 вт, вольтметры — не более 7,5 вт).

Отрицательные свойства приборов:

- 1) пригодность только для постоянного тока;
- 2) слабая перегрузочная способность (при длительной 20-процентной перегрузке перегорают пружинки или сама обмотка);
- 3) сравнительно высокая стоимость.

Шунты и добавочные сопротивления к приборам

Для получения высокой точности и чувствительности магнитоэлектрических приборов их подвижные обмотки выполняют по возможности легкими из очень тонкой изолированной

проводами. Такие обмотки допускают очень незначительные по величине токи, не превышающие 30 *ма*, причем сопротивление самих обмоток получается равным примерно 5 *ом*. Таким образом, магнитоэлектрическим прибором можно измерять ток не более 30 *ма*, а напряжение — не выше 150 *мв* (так как $U = IR = 30 \cdot 5 = 150 \text{ мв}$).

Для расширения пределов измерения амперметры снабжают шунтами, а вольтметры — добавочными сопротивлениями.

Шунт представляет собой проводник круглого или прямоугольного сечения с очень малым сопротивлением. Шунт включается параллельно с обмоткой амперметра (рис. 196) и отводит через себя большую часть измеряемого тока (согласно отношению $\frac{I_a}{I_{ш}} = \frac{R_{ш}}{R_a}$).

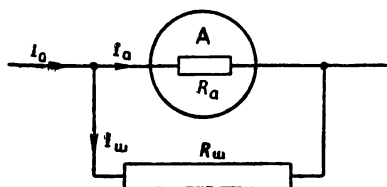


Рис. 196

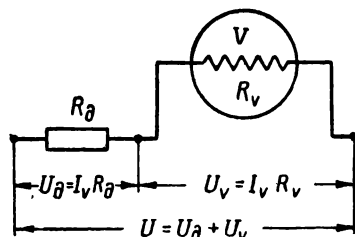


Рис. 197

У амперметров с пределами измерения до 100 *а* шунты имеют небольшие размеры, поэтому монтируются в самих приборах (в корпусе). Такие шунты называются внутренними. При токах выше 100 *а* шунты уже не помещаются в корпус прибора, поэтому их присоединяют к амперметрам снаружи специальными проводами. Такие шунты называются наружными.

Добавочные сопротивления изготавливаются в виде круглых или плоских катушек из тонкой изолированной проволоки. Величина сопротивлений получается очень значительной (от 100 до 20000 *ом* на каждый вольт предела шкалы прибора в зависимости от требуемой точности измерения; см. § 23 — режим холостого хода источника тока). Включаются добавочные сопротивления последовательно с обмоткой вольтметра (рис. 197) и поглощают излишнее напряжение.

В вольтметрах с пределами измерений до 600 *в* добавочные сопротивления монтируются внутри (в корпусе) прибора, при напряжениях же свыше 600 *в* вольтметры снабжаются отдельными добавочными сопротивлениями, заключенными в металлический кожух и имеющими выводы для подключения к прибору.

Шунты и добавочные сопротивления изготавливаются обычно из манганина, имеющего незначительный температурный ко-

ээффициент сопротивления $\left(\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^{\circ}\text{C}}\right)$, что уменьшает зависимость показаний приборов от температуры окружающей среды. Нагрев шунтов и добавочных сопротивлений до температуры выше 100°C не допускается (иначе они перегорают).

Сопротивления шунтов $R_{\text{ш}}$ и добавочных сопротивлений $R_{\text{д}}$ в каждом отдельном случае вычисляются по формулам.

Пусть необходимо увеличить предел измерения амперметра в n раз, тогда полный ток I_0 , измеряемый прибором, будет равен

$$I_0 = nI_a,$$

где I_a — ток, допускаемый обмоткой прибора.

Зная полный ток и ток в обмотке прибора, найдем ток в шунте:

$$I_{\text{ш}} = I_0 - I_a = nI_a - I_a = I_a(n - 1).$$

На основе свойства параллельных ветвей можем написать

$$\frac{R_{\text{ш}}}{R_a} = \frac{I_a}{I_a(n - 1)},$$

отсюда

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_a}{n - 1}, \quad (117)$$

где R_a — сопротивление обмотки прибора.

Полученной формулой и пользуются для расчета шунтов к амперметрам.

Теперь выведем формулу для вычисления величины добавочного сопротивления. Допустимое падение напряжения на обмотке вольтметра

$$U_V = I_V R_V,$$

где I_V — допустимый ток по обмотке;

R_V — сопротивление обмотки.

При увеличении предела измерения в n раз напряжение, измеряемое прибором, будет равно

$$U = nI_V R_V,$$

или

$$U = I_V R_V + I_V R_{\text{д}},$$

где $R_{\text{д}}$ — величина добавочного сопротивления.

Сравнив правые и левые части последних двух равенств, можем написать

$$nI_V R_V = I_V R_V + I_V R_{\text{д}},$$

отсюда

$$R_{\text{д}} = R_V(n - 1). \quad (118)$$

Это и есть формула для вычисления величины добавочных сопротивлений к вольтметрам.

Представление о пределах измерения некоторых типов магнитоэлектрических приборов дает табл. 11.

Таблица 11

Данные пределов измерения некоторых типов магнитоэлектрических приборов

Тип и название прибора	Пределы измерения	Класс точности	Внешнее оформление	Характер применения
Амперметр типа МН	0—1 <i>a</i> 0—2,5 " 0—5 " 0—10 " 0—20 " 0—30 " 0—50 " 0—75 " 0—100 "	1,5	В круглом металлическом корпусе. Высота прибора 75 мм, диаметр основания 185 мм	Щитовой прибор
Миллиамперметр типа М-2	0—1 <i>ма</i> 0—5 " 0—10 " 0—100 " 0—500 "	2,5	В круглом пластмассовом корпусе. Диаметр основания 80 мм	Щитовой прибор
Микроамперметр типа М-592	0—50 <i>мка</i> 0—100 " 0—200 " 0—300 " 0—500 "	2,5	В круглом пластмассовом корпусе. Диаметр основания 60 мм	Щитовой прибор
Вольтметр типа ММ	0—8 <i>в</i> 0—15 " 0—30 " 0—50 " 0—150 " 0—250 " 0—300 "	1,0	В круглом металлическом корпусе. Высота прибора 73 мм, диаметр основания 135 мм	Щитовой прибор
Милливольтметр типа ЛМ-1	0—75 <i>мв</i> 0—150 " 0—300 " 0—700 "	0,5	В пластмассовом корпусе прямоугольной формы	Лабораторный переносный прибор

§ 86. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Устройство и принцип действия приборов

Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на свойстве намагничивающей катушки втягивать в себя железный сердечник. Устройство электромагнитного прибора показано на рис. 198.

Подвижной системой прибора служит железный сердечник C в виде тонкой пластинки, эксцентрично насаженной на ось AB . К этой же оси прикреплены указательная стрелка, спиральные пружинки и поршеньек успокоителя. Ось своими концами удерживается в агатовых подпятниках,

Неподвижную часть прибора составляет намагничивающая плоская катушка K . Обмотка катушки выполнена из медной изолированной проволоки, наложенной на картонный каркас.

Успокоение подвижной системы осуществляется трением о воздух поршенька, перемещающегося в металлической дугообразной камере успокоителя. Такого рода успокоители называются воздушными. В приборах последних выпусков применяется магнитный успокоитель, в котором используется тормозящее действие вихревых токов (металлическая тонкая пластинка, укрепленная на оси прибора, перемещается в узком зазоре постоянного подковообразного магнита).

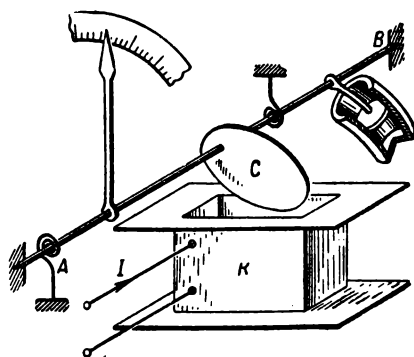


Рис. 198

Пружинки создают противодействующий момент и возвращают подвижную систему в начальное положение после выключения тока из обмотки.

Шкала и внешнее оформление приборов такие же, как и приборов магнитоэлектрической системы.

Приборы электромагнитной системы выполняются главным образом в виде амперметров и вольтметров переменного тока. При измерениях постоянного тока они почти не применяются, так как по точности значительно уступают магнитоэлектрическим приборам.

Для измерения малых величин токов и напряжений приборы электромагнитной системы непригодны из-за своей низкой чувствительности (вследствие слабого магнитного поля).

Работа приборов

При прохождении тока по обмотке намагничивающей катушки в приборе создается магнитное поле (рис. 199). Это поле намагничивает сердечник и возбуждает в его стороне, обращенной к катушке, противоположный полюс (на рисунке — северный) по отношению к собственному полюсу.

Благодаря взаимодействию разноименных полюсов на сердечник начинает действовать сила F , которая и втягивает его в узкую щель катушки. Вместе с сердечником поворачивается и указательная стрелка, отмечающая по шкале числовое значение измеряемой величины.

Действие силы F в приборе можно учесть вращающим моментом

$$M_{\text{вр}} = Fr,$$

где r — плечо силы относительно оси сердечника (расстояние по перпендикуляру между линией действия силы и осью).

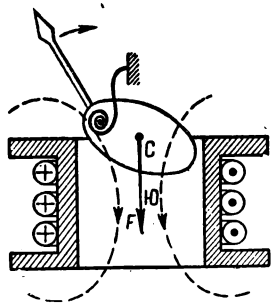


Рис. 199

Величина силы, действующей на сердечник, и величина вращающего момента находятся в сложной зависимости от тока, измеряемого прибором. Объясняется это различным расположением сердечника относительно катушки при его поворотах, что сказывается как на величине самой силы, так и на величине плеча этой силы относительно оси сердечника.

Если допустить, что величина плеча r пары сил в приборе не изменяется, и считать, что сила F пропорциональна току I , измеряемому прибором, и величине магнитной индукции B сердечника (при слабом магнитном насыщении магнитная индукция пропорциональна намагничивающему току), то для вращающего момента можно написать такое приближенное выражение

$$M_{\text{вр}} = c_1 I^2,$$

где c_1 — коэффициент пропорциональности.

Вращающий момент в приборе уравновешивается противодействующим моментом пружины $M_{\text{пр}} = c_2 \alpha$. При успокоении подвижной системы $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}}$, или $c_1 I^2 = c_2 \alpha$, отсюда $\alpha = c I^2$, где $c = \frac{c_1}{c_2}$.

Таким образом, у приборов электромагнитной системы шкала получается квадратичной, а следовательно, неравномерной, и в этом один из существенных недостатков приборов.

В отличие от приборов магнитоэлектрической системы

электромагнитные приборы не обладают полярностью, т. е. работают независимо от направления тока в обмотке катушки, так как магнитное поле всегда возбуждает в сердечнике полюс, противоположный собственному полюсу.

На практике электромагнитные приборы (амперметры и вольтметры) используются обычно для измерения действующих величин переменного тока, что достигается градуировкой шкал приборов при помощи тепловых приборов постоянного тока.

Свойства приборов

Электромагнитные приборы обладают следующими положительными свойствами:

- 1) простотой устройства и дешевизной (самые дешевые приборы);
- 2) высокой перегрузочной способностью (сечение проволоки обмотки может быть взято с запасом);
- 3) возможностью использования для постоянного и переменного токов;
- 4) сравнительно небольшой потребляемой мощностью (у амперметров до 5 Вт, у вольтметров до 10 Вт).

Отрицательные свойства приборов следующие:

- 1) небольшая точность измерений (технические приборы не изготавливаются выше 6-го класса);
- 2) непригодность для измерения малых величин тока и напряжения (из-за низкой чувствительности);
- 3) неравномерность шкалы;
- 4) большая зависимость показаний от внешних магнитных полей (собственное поле слабое).

Расширение пределов измерения у приборов

Благодаря отсутствию тока в подвижной системе электромагнитные амперметры можно выполнять на большие токи без шунта, так как сечение проволоки намагничивающей катушки не сказывается на чувствительности прибора. Для уменьшения мощности, потребляемой амперметром, его обмотка изготавливается из толстой проволоки и имеет небольшое количество витков.

Выпускаемые нашей промышленностью амперметры для непосредственного включения в цепь переменного тока имеют пределы измерения до 200 А. Для измерения больших токов амперметры включаются через особые измерительные трансформаторы.

У электромагнитных вольтметров обмотка катушки изготовляется из тонкой изолированной проволоки с большим числом витков. Для ограничения токов в обмотке (в целях

уменьшения потребляемой приборами мощности) у вольтметров с высокими пределами измерений имеются добавочные сопротивления (в корпусе), соединенные последовательно с обмотками. При измерении напряжений свыше 600 *в* вольтметры включаются через измерительные трансформаторы.

Данные электромагнитных приборов некоторых типов приводятся в табл. 12.

Таблица 12

Данные электромагнитных приборов некоторых типов

Тип и название прибора	Пределы измерения	Класс точности	Величина тока в обмотке вольтметра, <i>ма</i>	Внешнее оформление	Область применения
Амперметр типа ЭММ (электромагнитный малый модернизированный)	0—1 <i>а</i> 0—2,5 " 0—5 " 0—10 " 0—20 " 0—30 " 0—50 " 0—75 "	2,5		В круглом металлическом корпусе. Высота прибора 73 <i>мм</i> , диаметр основания 135 <i>мм</i>	Щитовой прибор
Вольтметр типа ЭНМ (электромагнитный нормальных размеров модернизированный)	0—15 <i>в</i> 0—50 " 0—150 " 0—250 " 0—450 " 0—600 "	2,5	250 180 62 35 20 20	В круглом металлическом корпусе. Высота прибора 75 <i>мм</i> , диаметр основания 185 <i>мм</i>	Щитовой прибор

§ 87. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Устройство и принцип действия приборов

Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии двух проводников при прохождении по ним электрического тока. Устройство электродинамического прибора показано на рис. 200.

В приборе имеются две катушки: подвижная *П* и неподвижная *Н*.

Неподвижная катушка состоит из двух одинаковых частей, обмотки которых соединены последовательно.

Подвижная катушка закреплена на вертикальной оси, и ток в нее подводится при помощи спиральных пружинок, как в приборе магнитоэлектрической системы. Пружинки от оси

изолированы. На ось катушки насажены также указательная стрелка и крыльчатка воздушного успокоителя. Для повышения точности и чувствительности прибора обмотка подвижной катушки выполнена из тонкой медной изолированной проволоки на ток не более 0,5 а.

Все части прибора смонтированы на алюминиевом основании, в нижней части которого имеется камера для крыльчатки успокоителя. Корпуса приборов либо пластмассовые, либо металлические (штампованные) с лицевой крышкой из пластмассы.

Приборы электродинамической системы изготавливаются в виде переносных амперметров, вольтметров и ваттметров. В качестве щитовых приборов они не применяются из-за своей дороговизны.

Работа приборов

При прохождении тока по обмоткам на подвижную катушку начинает действовать пара сил F , вследствие чего катушка поворачивается вместе с указательной стрелкой на тот или иной угол (на рис. 201 обмотки катушек показаны в разрезе, причем обмотка каждой катушки изображена одним витком).

При одновременном изменении направления тока в обеих обмотках направление сил F не изменяется (токи одного направления притягиваются). Благодаря этому электродинамические приборы могут быть применены как для постоянного, так и для переменного тока (для измерения действующих значений).

Величина силы F , действующей на каждую сторону подвижной катушки, получается в результате геометрического

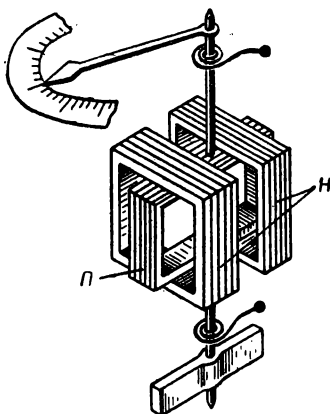


Рис. 200

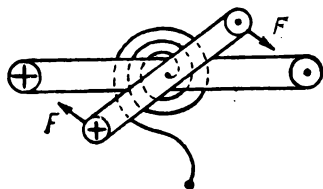


Рис. 201

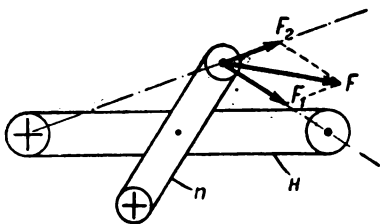


Рис. 202

сложения двух сил, как это показано на рис. 202 (сила F_1 притягивает верхнюю сторону подвижной катушки к правой стороне неподвижной катушки, а сила F_2 , наоборот, отталкивает ее от левой стороны неподвижной катушки).

Доказывается (доказательство из-за сложности не приводится), что вращающий момент $M_{вр}$, вызывающий поворот подвижной катушки в приборе, пропорционален величинам токов обеих катушек, поэтому для вращающего момента можно написать

$$M_{вр} = c_1 I_n I_p,$$

где I_n и I_p — токи неподвижной и подвижной катушек;
 c_1 — постоянный коэффициент, зависящий от геометрических размеров катушек.

Вращающий момент в приборе уравнивается противодействующим моментом пружинок:

$$M_{пр} = c_2 \alpha.$$

При успокоении подвижной катушки

$$M_{вр} = M_{пр},$$

или

$$c_1 I_n I_p = c_2 \alpha,$$

отсюда

$$\alpha = \frac{c_1}{c_2} I_n I_p,$$

или

$$\alpha = c I_n I_p, \quad (119)$$

где $c = \frac{c_1}{c_2}$.

Равенство (119) означает, что у электродинамических приборов угол поворота указательной стрелки пропорционален произведению токов обеих катушек. Пользуясь этим равенством, можно установить характер шкалы различных приборов электродинамической системы.

Соединение катушек приборов

В зависимости от назначения электродинамических приборов их катушки соединяют различно. У амперметров с пределами измерения до 0,5 а обе катушки соединяют последовательно (рис. 203, а). Для измерения же токов свыше 0,5 а катушки соединяют параллельно (рис. 203, б), при этом неподвижная обмотка выполняет роль шунта.

В первом случае токи в катушках одинаковы, поэтому

$$I_{\text{н}} = I_{\text{п}}.$$

Во втором случае ток неподвижной катушки пропорционален току подвижной катушки. Это следует из соотношения для параллельных ветвей

$$\frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{п}}} = \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{н}}},$$

откуда

$$I_{\text{н}} = \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{н}}} I_{\text{п}},$$

где $R_{\text{п}}$ и $R_{\text{н}}$ — сопротивления катушек.

Подставив значения токов неподвижной катушки в равенство (119), получим

$$\alpha = c I_{\text{п}}^2 \text{ и } \alpha = c \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{н}}} I_{\text{п}}^2.$$

Из этих двух равенств следует, что шкала электродинамических амперметров квадратичная, а поэтому и неравномерная (с увеличением измеряемого тока, например, в два раза угол поворота стрелок увеличивается в четыре раза и т. д.).

У вольтметров обе катушки соединяются только последовательно (рис. 204), причем для поглощения излишнего напряжения последовательно с катушками включается добавочное сопротивление $R_{\text{д}}$ внутри прибора. Благодаря последовательному соединению катушек ток в них получается одинаковым и может быть определен по формуле

$$I_{\text{н}} = I_{\text{п}} = \frac{U}{R},$$

где $R = R_{\text{н}} + R_{\text{п}} + R_{\text{д}}$ — эквивалентное сопротивление цепи катушек.

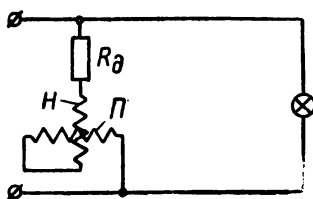


Рис. 204

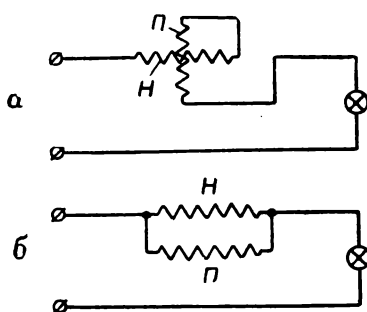


Рис. 203

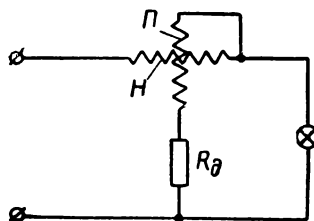


Рис. 205

Подставив значение тока в равенство (119), получим

$$\alpha = \frac{c}{R} U^2.$$

А это означает, что шкала у вольтметров также квадратичная.

Как у амперметров, так и у вольтметров все соединения катушек делаются внутри, в корпусе, поэтому приборы имеют только по два наружных вывода с зажимами для включения в цепь.

У ваттметров катушки не соединяются и имеют по два наружных вывода с зажимами. По отношению к приемнику неподвижная обмотка включается последовательно, а подвижная — параллельно, как показано на рис. 205.

При постоянном напряжении источника ток в подвижной катушке не изменяет своей величины и может быть вычислен по формуле

$$I_n = \frac{U}{R},$$

где $R = R_n + R_d$ — эквивалентное сопротивление цепи подвижной катушки.

Ток же в неподвижной катушке равен току приемника и определяется мощностью $P = UI_n$, потребляемой этим приемником. Подставив значение тока подвижной катушки в равенство (119), получим

$$\alpha = \frac{c}{R} UI_n,$$

или

$$\alpha = \frac{c}{R} P.$$

Это равенство означает, что шкала у ваттметра равномерная, так как угол поворота указательной стрелки пропорционален мощности, потребляемой приемником.

Теперь рассмотрим, каким образом учитывается величина $\cos \varphi$ приемников переменного тока при измерении их мощности электродинамическим ваттметром.

На рис. 206, а изображена схема электрической цепи для измерения мощности. Подвижная обмотка Π ваттметра включена параллельно приемнику, поэтому общей величиной для обеих параллельных ветвей является приложенное напряжение U .

Подвижную обмотку при работе прибора можно рассматривать как цепь с чисто активным сопротивлением (из-за большой величины добавочного сопротивления) и, следовательно, считать в ней ток I_n совпадающим по фазе с напря-

жением (рис. 206, б). По неподвижной же обмотке H проходит ток приемника I_H , который в зависимости от его параметров R , L и C может быть сдвинут на различные углы φ от того же самого напряжения, а значит, и от тока подвижной обмотки (рис. 206, б).

Установим, какое влияние оказывают различные углы сдвига фаз между токами обмоток на величину вращающего момента, от которого зависит угол отклонения указательной стрелки в приборе.

Так как по обмоткам прибора проходят переменные токи, то выражение для мгновенного вращающего момента на основе формулы

$$M_{вр} = c_1 I_n I_H$$

следует написать так:

$$M_{вр} = c_1 i_n i_H,$$

где i_n и i_H — мгновенные значения токов в подвижной и неподвижной обмотках.

На рис. 207 изображены линейные диаграммы токов и вращающего момента для трех различных значений угла φ .

Из рис. 207, а видно, что если токи обеих обмоток совпадают по фазе ($\varphi = 0$), то вращающий момент в течение периода получается одного знака и действует на подвижную обмотку все время в одном направлении (на рис. 206, а по часовой стрелке, так как токи одного направления притягиваются).

Совершенно другое получается при сдвиге фаз между токами в обмотках (рис. 207, б).

В этом случае на некоторых участках периода токи обмоток имеют различное направление (отталкиваются), вследствие чего изменяется и направление вращающего момента на этих участках, а подвижная обмотка в результате обратного действия на нее вращающего момента отклоняется на меньший угол. По мере увеличения угла φ (рис. 207, в) обратное действие вращающего момента на подвижную обмотку становится все длительнее, и это в свою очередь приводит к еще меньшему отклонению стрелки.

Таким образом, благодаря возникновению в ваттметре

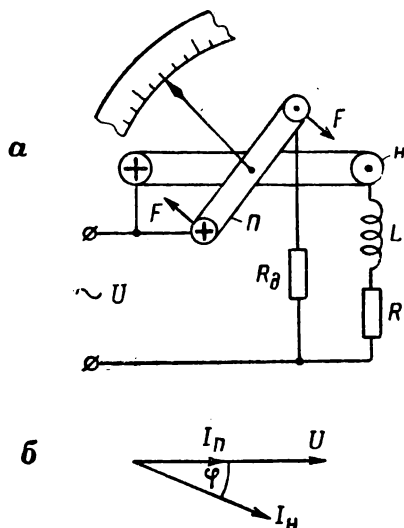


Рис. 206

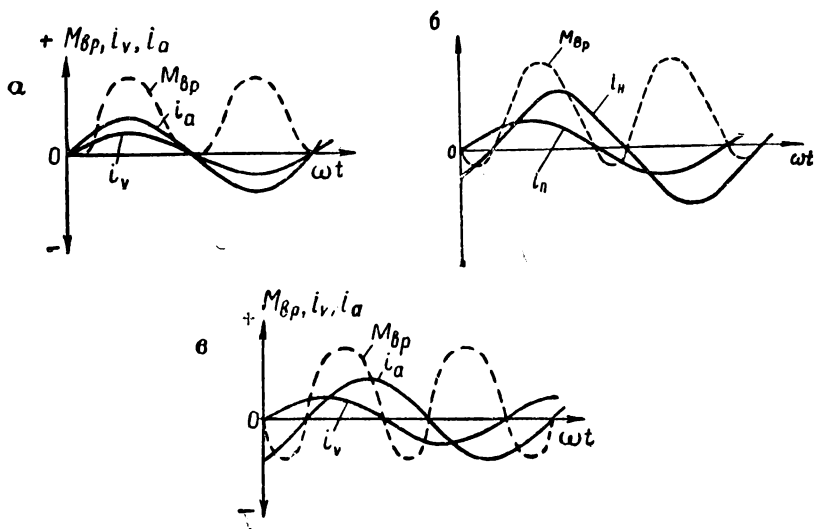


Рис. 207

обратного вращающего момента из-за сдвига фаз между токами обмоток величина $\cos \varphi$ приемников при измерении их мощности учитывается прибором автоматически.

Свойства приборов

Приборы электродинамической системы обладают следующими положительными свойствами:

1) высокой точностью (относится ко второму и третьему классам и по точности являются самыми лучшими приборами переменного тока);

2) пригодностью для постоянного и переменного токов при одной шкале;

3) равномерностью шкалы у ваттметров.

Отрицательные свойства приборов следующие:

1) значительная зависимость показаний от внешних магнитных полей (у приборов обычной конструкции собственное поле слабое);

2) слабая перегрузочная способность (как и у магнитоэлектрических приборов) из-за наличия тока в подвижной системе;

3) неравномерность шкалы у амперметров и вольтметров;

4) сравнительно большая потребляемая мощность (у амперметров до 10 Вт, у вольтметров до 15 Вт);

5) высокая стоимость.

§ 88. ПРИБОРЫ ТЕПЛОВОЙ СИСТЕМЫ

Устройство и принцип действия

Принцип действия приборов тепловой системы основан на удлинении проводника при нагревании его током. Устройство теплового прибора показано на рис. 208.

Главной частью прибора является платино-иридиевая проволока AB , которая при прохождении по ней измеряемого тока удлиняется. Удлинение проволоки с помощью тонкой бронзовой проволоочки cd , блокка B , шелковой нити (охватывает собой блок) и пружины Π используется для поворота указательной стрелки на тот или иной угол. На ось указательной стрелки насажена металлическая пластинка $У$ магнитного успокоителя. Все детали прибора смонтированы в металлическом корпусе.

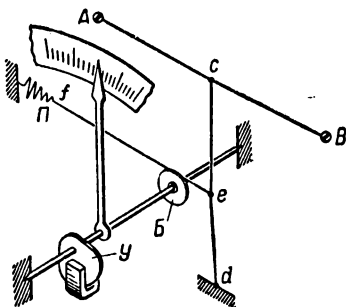


Рис. 208

Приборы тепловой системы изготавливаются в виде амперметров и вольтметров для постоянного и переменного токов (проволока AB нагревается и удлиняется независимо от рода тока).

В настоящее время тепловые приборы нашей промышленностью серийно не выпускаются из-за ряда их существенных недостатков. Основное применение эти приборы находят при градуировке приборов переменного тока, предназначенных для измерения действующих значений переменных величин (т. е. тока и напряжения).

Шкала у приборов квадратичная. Это объясняется тем, что угол поворота α указательной стрелки пропорционален удлинению Δl платино-иридиевой проволоки. Само же удлинение зависит от количества тепла Q , выделяемого током в проволоке и, следовательно, пропорционально квадрату величины этого тока (так как $Q = 0,24 I^2 R t$). Таким образом, для угла поворота указательной стрелки теплового прибора можно написать

$$\alpha = c I^2,$$

где c — некоторый постоянный коэффициент.

Это равенство и означает, что шкала у тепловых приборов квадратичная.

Свойства приборов

Тепловые приборы обладают следующими положительными свойствами:

- 1) полной независимостью показаний от внешних магнитных полей;
- 2) пригодностью как для постоянного, так и для переменного токов;
- 3) независимостью показаний от частоты и формы кривой тока.

Отрицательные свойства приборов следующие:

- 1) зависимость показаний от температуры окружающей среды;
- 2) изменение градуировки у шкалы при незначительных перегрузках приборов (из-за остаточного удлинения проволоки AB);
- 3) сравнительно высокая стоимость и небольшая надежность (указательная стрелка часто сбивается с нулевого положения);
- 4) сравнительно большая потребляемая мощность;
- 5) неравномерность шкалы.

§ 89. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Из приборов термоэлектрической системы мы рассмотрим только амперметр, применяемый для измерения переменных токов высокой частоты (от 0,3 до 7,5 мГц).

Он состоит из магнитоэлектрического прибора большой чувствительности (обычно микроамперметра) и термопреобразователя (рис. 209). Термопреобразователь в свою очередь состоит из термоэлемента (медь — константан) и нагревательной металлической нити ab .

Принцип работы прибора основан на преобразовании тепловой энергии измеряемого тока в электрическую энергию термоэлемента. Проходя по нагревательной нити ab , измеряемый ток i нагревает место спая c термоэлемента и создает в нем электродвижущую силу. Электродвижущая сила посылает ток в обмотку магнитоэлектрического прибора и заставляет отклоняться его указательную стрелку.

Шкала прибора градуируется на действующие значения измеряемого переменного тока с помощью теплового прибора T постоянного тока, включаемого последовательно с нагревательной нитью. Термоэлектрическими амперметрами можно измерять токи до 50 а.

Детали магнитоэлектрического измерительного прибора

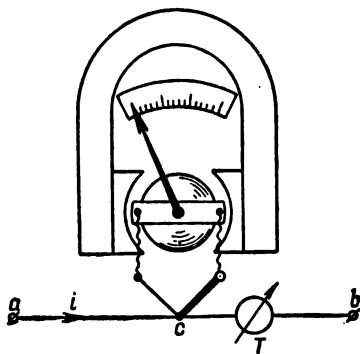


Рис. 209

монтируются в пластмассовом брызгонепроницаемом корпусе. Термопреобразователь выполняется обычно в отдельном корпусе и присоединяется к прибору специальными проводами.

Термоэлектрические приборы имеют следующие положительные свойства:

- 1) небольшую зависимость от внешних магнитных полей (как у магнитоэлектрических приборов);
- 2) незначительную потребляемую мощность (тысячные доли ватта);
- 3) возможность измерения постоянного и переменного токов.

Отрицательные свойства приборов:

- 1) сравнительная дороговизна;
- 2) невысокая точность (не выше 3-го класса);
- 3) незначительная перегрузочная способность (при перегрузке более 10% перегорает нагревательная нить термопреобразователя).

§ 90. ЧАСТОТОМЕРЫ

Частотомеры — это приборы для измерения частоты переменного тока. Наиболее распространенным из них является частотомер вибрационной системы.

Принцип работы вибрационного частотомера основан на использовании явления механического резонанса, возникающего в тонких стальных пластинках — язычках. Устройство прибора показано на рис. 210.

Прибор состоит из подковообразного электромагнита *М*, металлической рейки *Р*, железного якоря *Я* и двадцати одного язычка с различной частотой собственных свободных колебаний — от 45 до 55 *гц*. Якорь и язычки прикреплены к рейке, которая пластинчатыми пружинами *А* и *В* прикреплена к железному штампованному основанию прибора. Электромагнит с помощью стойки (не показана на рисунке) также прикреплен к основанию прибора. Между сердечником электромагнита и якорем имеется воздушный зазор.

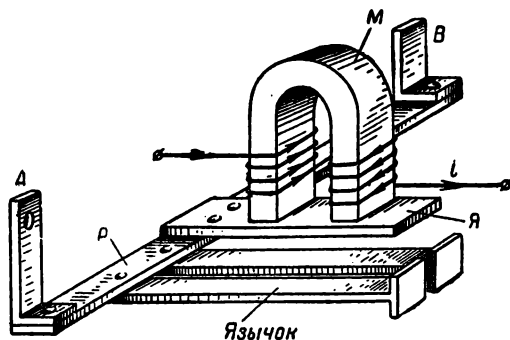


Рис. 210

При пропускании переменного тока через катушку электромагнита якорь то притягивается сердечником, то отпускается и этим самым совершает колебания с частотой, равной частоте переменного тока. Вместе с якорем колеблются и все язычки, укрепленные на рейке. Колебания эти незначительны по амплитуде и незаметны на глаз до тех пор, пока частота тока отличается от частоты собственных колебаний язычков. Если же частота тока становится равной частоте собственных колебаний одного из язычков, то амплитуда его колебаний резко возрастает из-за возникающего в нем механического резонанса.

Возрастание амплитуды резонирующего язычка уже отчетливо наблюдается глазом человека и поэтому дает возможность отсчитывать измеряемую частоту. Для облегчения отсчета на язычки напаяны наконечники в виде квадратных пластинок размером примерно 5×5 мм. Наконечники окрашены в белый цвет и резко выделяются на темном фоне прорези, сделанной на основании шкалы прибора.

Все детали прибора закрыты железным кожухом, имеющим с передней стороны смотровое стекло.

Прибор включается в цепь, как вольтметр, поэтому внутри имеет добавочное сопротивление, соединенное последовательно с намагничивающей катушкой электромагнита. Напряжение, на которое прибор можно безопасно включать в цепь, указывается на шкале.

Предел измерения прибора 45—55 гц, цена деления шкалы 0,5 гц, максимальная погрешность прибора не превышает 1,0 %.

Частотомер рассмотренного типа применяется для измерения частоты промышленного переменного тока.

§ 91. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Принцип действия приборов для измерения сопротивлений основан на том, что согласно закону Ома ($I = \frac{U}{R_x}$) о величине сопротивления R_x в любой простой цепи при неизменном напряжении в ней можно судить по величине тока, указываемой стрелкой измерительного прибора, включенного в цепь. Благодаря этому, пользуясь эталонными сопротивлениями, включаемыми в цепь, шкалу прибора можно отградуировать прямо в омах.

В качестве измерительного прибора используется прибор магнитоэлектрической системы, обладающий высокой чувствительностью.

Следует различать приборы для измерения сопротивления проводников и приборы для измерения сопротивления изоли-

рующих материалов. Первые называются омметрами, а вторые — мегомметрами или меггерами.

Рассмотрим устройство и работу приборов на конкретных образцах.

Магнитоэлектрический омметр типа М-57

Прибор состоит из обычного магнитоэлектрического вольтметра с пределом измерения 0—4,4 в и батареи сухих марганцево-цинковых элементов с напряжением 4—4,7 в. Корпус прибора пластмассовый. В верхней части корпуса укреплен вольтметр, а в нижней помещается батарея. Для замены и осмотра батареи в корпусе имеется откидная крышка, закрепляемая винтом.

Электрическая схема прибора изображена на рис. 211. Измеряемое сопротивление R_x подсоединяется к зажимам прибора A и B .

Градуйровка шкалы прибора производится на заводе следующим образом. В прибор вставляют батарею и закорачивают его зажимы A и B проводником очень малого сопротивления ($R \approx 0$). После этого подбирают добавочное сопротивление R_0 такой величины, чтобы указательная стрелка вольтметра отклонилась на полный угол вправо. Этому положению стрелки соответствует нуль ом между закороченными зажимами A и B , и его наносят на шкалу прибора. Подобранный к вольтметру добавочное сопротивление вследствие этого называют нулевым сопротивлением.

Затем снимают с зажимов A и B закорачивающий проводник, подключают к ним эталонные сопротивления различной величины, начиная с малых, и против каждого положения стрелки наносят на шкалу значения подключаемого сопротивления. По мере возрастания сопротивлений указательная стрелка все больше удаляется от нуля влево из-за уменьшения тока в обмотке прибора. При величине эталонного сопротивления 5000 ом стрелка прибора практически занимает крайнее левое положение, т. е. такое же, как и при разомкнутой цепи (из-за малого тока стрелка почти не отклоняется).

Таким образом, у омметра типа М-57 шкала имеет предел 0—5000 ом. Точность прибора небольшая, он является внеклассным прибором. Омметр типа М-57 применяется для грубого измерения сопротивлений.

При изменении напряжения батареи, что очень часто бывает на практике у батарей из марганцево-цинковых элемен-

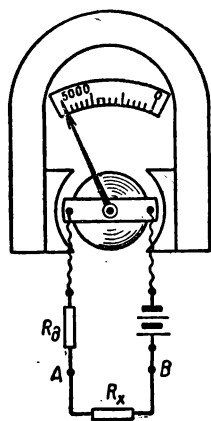


Рис. 211

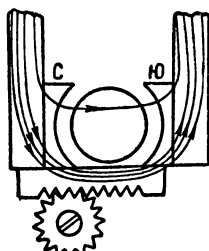


Рис. 212

тов, указательная стрелка не показывает нуля при закороченных зажимах *A* и *B* прибора. Для установки ее на нуль в приборе имеется дополнительное устройство, называемое магнитным шунтом (рис. 212).

По мере перемещения шунта (т. е. железной пластинки) *с* помощью шестеренки вправо магнитные силовые линии постоянного магнита все больше и больше начинают ответвляться через него, встречая здесь как бы меньшее сопротивление. В результате густота магнитных силовых линий

в воздушном зазоре прибора уменьшается, а это приводит к уменьшению магнитной индукции *B*, а значит, и силы *F*, вызывающей поворот подвижной системы прибора. Из-за уменьшения силы *F* подвижная система поворачивается на меньший угол.

При перемещении шунта влево густота магнитных силовых линий в воздушном зазоре прибора возрастает, сила *F* увеличивается и поворачивает подвижную систему на больший угол.

Так, изменяя положение шунта, всегда можно установить указательную стрелку против нуля. В омметре шунт перемещается с помощью оси шестерни, один конец которой имеет шлиц и выходит на лицевую сторону прибора.

При пользовании омметром необходимо придерживаться такого порядка:

- 1) вставить в прибор батарею и закоротить зажимы *A* и *B*;
- 2) установить указательную стрелку на нуль с помощью шунта;
- 3) снять закорачивающий проводник с зажимов, подсоединить к ним измеряемое сопротивление и произвести отсчет по шкале.

Мегомметр

От омметра мегомметр отличается только тем, что вместо батареи он имеет маленькую динамомашину постоянного тока, которая при постоянной скорости вращения дает то или иное постоянное напряжение (80—500 в у различных мегомметров). Шкала мегомметра градуируется так же, как и шкала омметра, только предел измерения у них значительно выше, 2—100 мгом.

Электрическая схема простейшего мегомметра, у которого динамомашина развивает напряжение в 80 в, изображена на рис. 213. Здесь кнопка *K* выполняет роль проводника, закорачивающего зажимы *A* и *B*. Для измерения сопротивления изоляции обмотки какого-либо прибора или электрической

машины к одному из зажимов мегомметра (*A* или *B*) присоединяют вывод от проводника, образующего обмотку, а к другому зажиму — корпус прибора или машины (от корпусов обмотка всегда изолирована), как показано на рис. 213. После этого нажимают кнопку *K* и вращают рукоятку прибора *P* со скоростью примерно 3 об/сек, чтобы указательная стрелка отклонилась на полный угол и показала 0 ом. Затем, не изменяя скорости вращения рукоятки, отпускают кнопку и производят отсчет по шкале.

Мегомметр — очень удобный прибор. Им можно проверять целостность проводов, кабеля и отдельных участков цепей. Для этого провод, кабель или участок цепи обоими концами подсоединяют к зажимам мегомметра и поступают так же, как и при измерении изоляции. В случае обрыва в цепи мегомметр показывает бесконечно большое сопротивление, а при отсутствии повреждения — нуль.

Выпускаемый нашей промышленностью мегомметр типа М-1101 имеет две шкалы: нижнюю на 2 мгом и верхнюю на 100 мгом. Для перехода с одной шкалы на другую имеется переключатель. Кнопки для предварительной установки стрелки в нулевое положение в приборе нет.

При вращении рукоятки прибора со скоростью 2 об/сек динамомашинка развивает напряжение в 500 в. Для обеспечения нормальной скорости вращения динамомашинки в приборе установлен специальный регулятор.

Все части прибора смонтированы в пластмассовом корпусе.

Пользоваться прибором следует в таком порядке:

1) поставить переключатель на нужную шкалу (в зависимости от измеряемого сопротивления);

2) подсоединить изоляцию обмотки к зажимам (так же, как и к простейшему мегомметру);

3) вращая рукоятку со скоростью 2 об/сек, произвести отсчет по шкале.

§ 92. МНОГОПРЕДЕЛЬНЫЕ И КОМБИНИРОВАННЫЕ ПРИБОРЫ

Рассмотренные нами приборы магнитоэлектрической, электромагнитной и электродинамической систем являются однопредельными (шкалы имеют один предел), рассчитанными для измерения какой-либо одной электри-

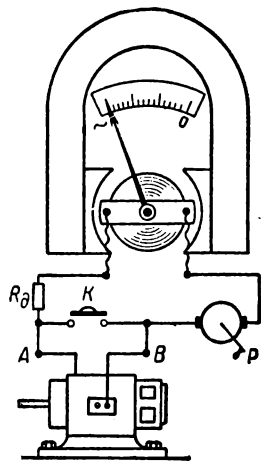


Рис. 213

ческой величины. В настоящее время наряду с такими приборами все шире начинают применяться многопредельные и комбинированные приборы.

Многопредельным прибором можно измерять одну и ту же величину в нескольких пределах (например, ток в пределах 0—1, 0—5, 0—15 а), а комбинированным — несколько различных величин (например, ток, напряжение и сопротивление).

Комбинированный прибор одновременно может быть и многопредельным. На практике чаще всего встречаются многопредельные и комбинированные приборы магнитоэлектрической системы. У многопредельных приборов

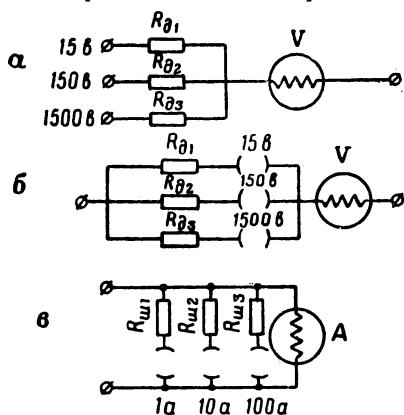


Рис. 214

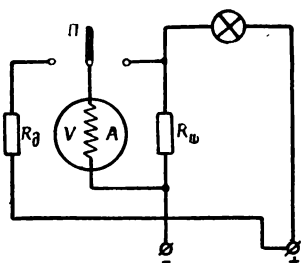


Рис. 215

этой системы количеству пределов соответствует такое же количество шунтов (у амперметров) или добавочных сопротивлений (у вольтметров).

Для включения на разные пределы прибор снабжен зажимами или штепсельными гнездами (в этом случае имеются два общих зажима). На рис. 214 изображены электрические схемы магнитоэлектрического трехпредельного вольтметра с дополнительными зажимами (214, а) и со штепсельными гнездами (214, б). Электрическая схема трехпредельного амперметра приведена на рис. 214, в.

Простейшим комбинированным прибором магнитоэлектрической системы является вольтамперметр, имеющий шунт и добавочное сопротивление и в соответствии с этим двойную шкалу. Электрическая схема вольтамперметра изображена на рис. 215.

Пользование прибором осуществляется с помощью однополюсного переключателя П. При выключенном ноже переключателя (рис. 215) измерительный прибор вообще не работает, а по шунту проходит полный ток приемника (лампы на рисунке). Если нож переключателя поставить в правое поло-

жение, то прибор включается параллельно с шунтом и работает как амперметр. При левом же положении ножа переключателя прибор включается последовательно с добавочным сопротивлением и поэтому работает как вольтметр. Описанный прибор успешно применяется на практике.

В качестве примера многопредельного комбинированного прибора можно привести ампервольтметр типа ТТ-1. Этот прибор позволяет измерять постоянный ток, напряжение постоянного и переменного токов, а также сопротивление проводников, причем все эти величины можно измерять в различных пределах.

Измерителем в ампервольтметре служит магнитоэлектрический микроамперметр. При работе прибора в качестве омметра используется сухая гальваническая батарея. Напряжение переменного тока измеряется с помощью купроксного выпрямителя, смонтированного внутри прибора. Для перехода на ту или иную шкалу имеется переключатель.

Включение прибора при измерении необходимой величины производится через штепсельные гнезда, имеющие соответствующие обозначения.

Прибор очень удобен и широко используется для измерений в радиотехнике.

§ 93. ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ И НЕИСПРАВНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

При пользовании измерительными приборами необходимо придерживаться следующих правил:

1) не допускать резкого сотрясения приборов (в результате толчков или ударов);

2) не перегружать приборы током (брать всегда прибор с запасом предела измерения по шкале);

3) избегать работы с приборами в сырых помещениях и под дождем;

4) периодически (один раз в год) проверять правильность показаний приборов контрольными приборами (гарантийный срок службы приборов при частой их работе 9—12 месяцев, после этого приборы необходимо проверять);

5) хранить приборы в чистых закрытых помещениях с температурой воздуха 10—35° С и при относительной влажности воздуха не более 80 %;

6) следить за тем, чтобы в помещениях, где хранятся приборы, не было вредных испаряющихся веществ (кислот, щелочей), вызывающих коррозию;

7) периодически в зависимости от условий эксплуатации производить технический осмотр приборов (проверять состояние корпуса и смотрового стекла, работу корректора, состоя-

ние зажимов и указательной стрелки) и проверять их работу под током (действие успокоителя и вращение подвижной системы).

Основные неисправности приборов и способы их устранения приведены в табл. 13.

Таблица 13

Основные неисправности приборов и способы их устранения

Название неисправности	Причина неисправности	Способ устранения неисправности
Погнутость указательной стрелки	Сильный удар по ограничителю при больших токах	Снять крышку корпуса и осторожно выпрямить стрелку
Заскакивание стрелок за ограничитель	Сильный удар по ограничителю при больших токах	Снять крышку корпуса и освободить стрелку
Отставание бумажной шкалы от ее основания	Отсыревание прибора	Снять крышку корпуса и подклеить шкалу мучным клеем
Поломка смотрового стекла	Неосторожное обращение с прибором	Снять крышку корпуса и заменить стекло

Все остальные неисправности, возникающие в приборах (перегорание обмоток, шунтов и добавочных сопротивлений, а также токоведущих пружинок), устраняются в специальных мастерских.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ VII

1. Перечислите существующие системы электрических измерительных приборов.
2. Что называется ошибкой измерительного прибора?
3. Каких классов точности бывают измерительные приборы?
4. Какие требования предъявляются к измерительным приборам?
5. Опишите устройство и принцип действия приборов магнитоэлектрической системы.
6. Как достигается равномерность шкалы у приборов магнитоэлектрической системы?
7. Каковы свойства приборов магнитоэлектрической системы?
8. Для чего служат шунты и добавочные сопротивления?
9. Опишите устройство, принцип действия и свойства приборов электромагнитной системы.
10. Каковы устройство, принцип действия и свойства приборов электродинамической системы?
11. Как соединяются между собой обмотки катушек у различных приборов электродинамической системы?
12. Опишите устройство, принцип действия и свойства приборов тепловой системы.
13. На чем основана работа магнитоэлектрического омметра?
14. Как градуируется шкала омметра и каково назначение в нем магнитного шунта?

15. Как нужно пользоваться омметром?
 16. Чем отличается мегомметр от омметра?
 17. Что представляют собой многопредельные и комбинированные измерительные приборы (привести примеры приборов)?
 18. Каковы правила эксплуатации измерительных электрических приборов?
 19. Каковы основные неисправности измерительных приборов и как они устраняются?
 20. Опишите устройство и принцип работы термоэлектрического амперметра.
 21. Каково устройство и принцип работы частотомера?
-

ГЛАВА VIII

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 94. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРОВ. НАЗНАЧЕНИЕ И РАБОТА КОЛЛЕКТОРА

Генераторами постоянного тока, или динамомашинами, называются электрические машины, превращающие механическую энергию в электрическую.

Первые динамомашинны появились в 70-х годах прошлого века и до появления трехфазного тока были единственными источниками электрической энергии промышленного значения.

В настоящее время машины постоянного тока, в особенности двигатели, успешно применяются в ряде областей благодаря некоторым преимуществам перед машинами переменного тока.

По устройству генераторы постоянного тока очень просты и не представляют трудностей для изучения. Единственной частью, которая вызывает некоторые затруднения в понимании ее работы, является коллектор. На этой части мы остановимся более подробно.

Принцип работы генераторов основан на использовании явления электромагнитной индукции. Электродвижущая сила в генераторах наводится способом индукции путем перемещения проводников в неподвижном магнитном поле.

Каждый генератор состоит из двух главных частей — индуктора и якоря. Индуктор создает сильное магнитное поле в генераторе, а в якорной обмотке возникает электродвижущая сила.

Работу коллектора удобнее всего рассмотреть на генераторе, в котором сердечник якоря имеет форму полого цилиндра или кольца (поэтому якорь называется кольцевым), а обмотка на якоре выполнена в виде замкнутого тороида, как показано на рис. 216, а. Устройство индуктора такой машины изображено на рис. 216, б. Для усиления магнитного поля между полюсами индуктора сердечник выполняется из железа (малоуглеродистая сталь).

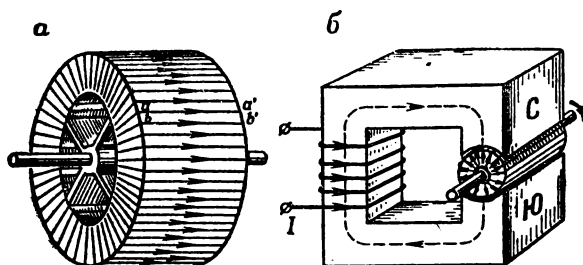


Рис. 216

При вращении якоря в магнитном поле индуктора (рис. 217, а) активные стороны витков обмотки (стороны aa' , bb' и т. д. на рис. 216, а) пересекают магнитные силовые линии, поэтому в витках возникают электродвижущие силы. Эти электродвижущие силы являются переменными по величине и направлению, так как каждый виток за один оборот якоря проходит поочередно под обоими полюсами индуктора и встречает на своем пути магнитное поле с различной магнитной индукцией (по краям полюсов густота магнитных силовых линий меньше). Примерный график электродвижущей силы в витке за один оборот якоря изображен на рис. 217, б.

В торцовых сторонах витков, а также в сторонах, расположенных на внутренней поверхности якоря, электродвижущие силы не возникают, так как эти стороны не пересекают магнитных силовых линий. Направление электродвижущих сил в активных сторонах витков определяется по правилу правой руки. На рис. 217, а это направление указано стрелками на торцовых сторонах витков для принятого направления вращения якоря (на рис. 216, а оно указано на активных сторонах витков).

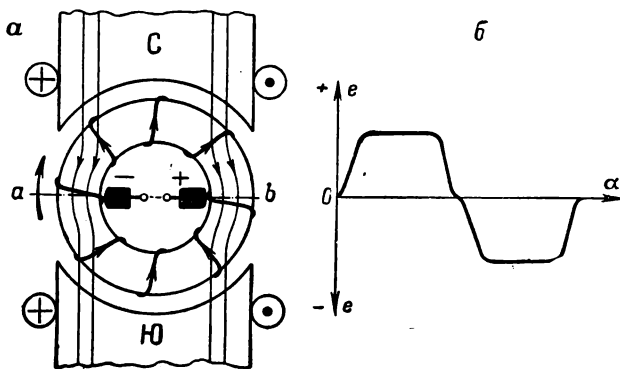


Рис. 217

Линия ab в генераторе называется **нейтральной линией**, или **электрической нейтралью**. При переходе через нее активные стороны витков не пересекают магнитных силовых линий («скользят» по ним) и в них не возникают электродвижущие силы. Нейтральная линия делит обмотку якоря на две части, которые называются **параллельными ветвями** обмотки.

Электродвижущие силы витков, образующих одну параллельную ветвь, в любой момент времени имеют одинаковое направление (проходят под одним полюсом), поэтому складываются и образуют электродвижущую силу параллельной ветви такого же направления. Это направление электродвижущей силы за все время вращения якоря остается неизменным, в этом и заключается основное свойство параллельных ветвей, очень важное для понимания работы коллектора.

Величины электродвижущих сил параллельных ветвей зависят от скорости вращения якоря и от магнитной индукции поля ($E = Blv$). При равномерном наложении обмотки на якорь количество витков, входящих в каждую параллельную ветвь, остается одинаковым при любом положении якоря, поэтому и электродвижущие силы параллельных ветвей получаются равными. Благодаря равенству электродвижущих сил и противоположному их направлению (ветви расположены под разноименными полюсами) они уравнивают друг друга и не вызывают тока в обмотке, хотя она и образует замкнутую электрическую цепь.

Итак, несмотря на наличие переменных электродвижущих сил в витках якорной обмотки, в параллельных ветвях этой же обмотки электродвижущие силы получаются неизменными по направлению, и их нужно только уметь использовать. Трудность использования заключается в том, что в точках стыка параллельных ветвей, т. е. в точках, расположенных на нейтральной линии, витки непрерывно переходят

из одной параллельной ветви в другую, а к этим точкам как раз и нужно подсоединять внешнюю цепь генератора, чтобы использовать электродвижущие силы его параллельных ветвей.

Подсоединение внешней цепи генератора наиболее просто можно было осуществить так: снять наполовину изоляцию с внутренней стороны витков (рис. 218, а) и прижать к ним две пружиня-

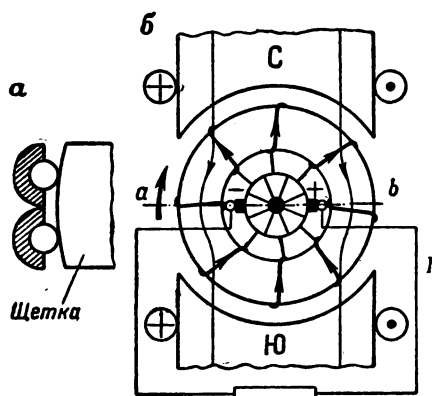


Рис. 218

щие пластины (щетки), расположенные по нейтральной линии ab , как это показано на рис. 217, a . В этом случае витки якорной обмотки, перемещаясь из одной параллельной ветви в другую, поочередно будут касаться щеток и соединять их с параллельными ветвями.

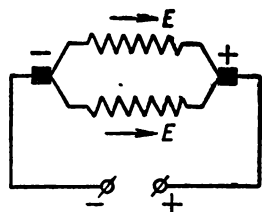


Рис. 219

Однако такое устройство привело бы к быстрому перетиранию обмотки, поэтому вместо него применяют коллектор, представляющий собой полый цилиндр, набранный из отдельных медных пластин, изолированных одна от другой. К каждой пластине коллектора с помощью короткого проводника припаян один виток якорной обмотки (рис. 218, b) той точкой, которой бы он касался щеток при отсутствии коллектора. Если теперь щетки прижать к коллектору (оставляя их на нейтральной линии), то можно через него соединяться с параллельными ветвями при вращении якоря и, следовательно, использовать их электродвижущие силы. При направлении электродвижущих сил, указанном на рис. 218, b , правая щетка будет положительной, а левая отрицательной. Принципиальная схема якорной обмотки изображена на рис. 219.

Таковы назначение и работа коллектора в генераторах постоянного тока. Иногда говорят, что коллектор служит для выпрямления переменной электродвижущей силы в постоянную. Это не совсем верно, так как коллектор не выпрямляет электродвижущую силу, а только дает возможность подсоединяться к параллельным ветвям якорной обмотки и использовать имеющиеся в них постоянные электродвижущие силы.

Мы рассмотрели двухполюсный генератор, но возможны и многополюсные генераторы, имеющие p пар полюсов. Так, в четырехполюсном генераторе (рис. 220) имеются четыре

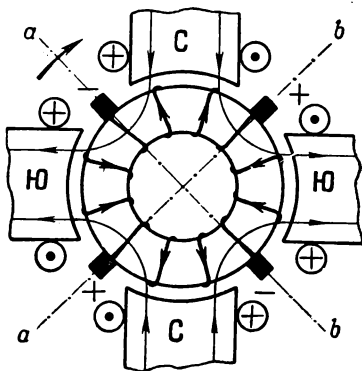


Рис. 220

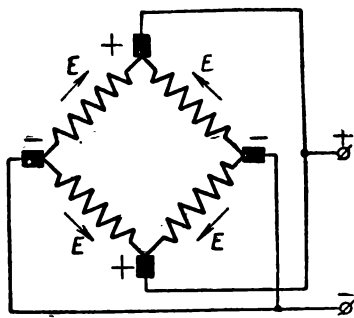


Рис. 221

параллельные ветви и две нейтральные линии. У такого генератора должно быть четыре щетки — две положительные и две отрицательные (коллектор на рис. 220 не показан, чтобы не усложнять чертежа). Вообще в генераторе должно быть всегда столько щеток, сколько полюсов. Одноименные щетки соединяются вместе и образуют общий зажим генератора, как показано на принципиальной схеме (рис. 221).

Дальнейшее усовершенствование генераторов шло в отношении якоря.

В генераторе с кольцевым якорем нерационально использовалась медная проволока, из которой изготовлялась обмотка, а наложение самой обмотки было крайне затрудни-

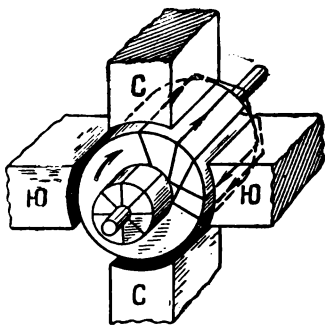


Рис. 222

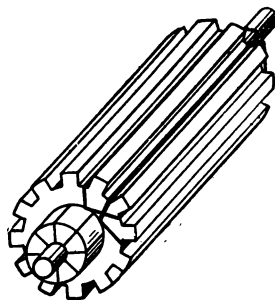


Рис. 223

тельно. Эти недостатки были устранены в гладком барабанном якоря.

Наложение обмотки на барабанный якорь показано на рис. 222. Из рисунка видно, что у каждого витка обмотки используются уже две стороны в качестве активных, причем наложение обмотки значительно упрощается. Ширина каждого витка делается такой, чтобы его стороны всегда располагались под двумя соседними разноименными полюсами, так как только в этом случае электродвижущие силы активных сторон витка будут складываться. Торцовые стороны витков называются лобовыми соединениями. Лобовое соединение, обращенное к коллектору, называется передним, а противоположное соединение — задним.

Позже обмотку гладкого барабанного якоря стали укладывать не по его поверхности, а в продольные пазы (рис. 223). Преимущество такого якоря заключается в том, что на нем удобнее крепить обмотку. Кроме того, значительно уменьшается воздушный зазор между якорем и полюсами, что уменьшает сопротивление магнитному потоку, а следовательно, требует меньшего количества ампер-витков намагничивающей катушки.

Такой якорь, называемый зубчатым барабанным якорем, применяется во всех современных машинах постоянного тока. Обмотка на барабанном якоре замкнутая, как и в старом кольцевом якоре.

§ 95. УСТРОЙСТВО СОВРЕМЕННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Внешний вид современного генератора серии ПН отечественного производства показан на рис. 224. Генераторы такого типа выпускаются мощностью 0,37—130 квт с напряжениями 115, 230 и 460 в.

Индуктор генератора состоит из станины, главных и добавочных полюсов (рис. 225).

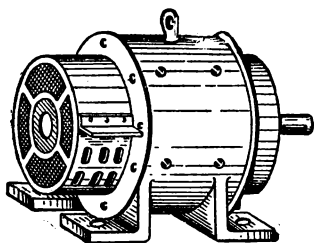


Рис. 224

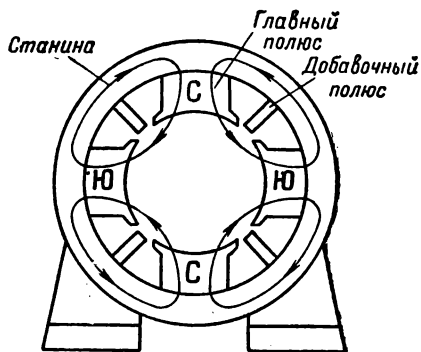


Рис. 225

Станина — стальная, в форме полого цилиндра. К нижней части ее приварены стальные лапы для крепления генератора к фундаменту.

Главные и добавочные полюсы представляют собой стержневые электромагниты, сердечники которых болтами прикреплены к внутренней поверхности станины. Концы сердечников главных полюсов, называемые полюсными наконечниками или башмаками, несколько расширены в сторону якоря. С помощью наконечников создается примерно одинаковая густота магнитных силовых линий для всех витков параллельных ветвей якорной обмотки.

Сердечники главных полюсов набираются из листовой динамной стали толщиной 0,5 мм для уменьшения паразитных токов, которые возникают в полюсных наконечниках из-за перераспределения в них магнитного потока вследствие зубчатой поверхности якоря (рис. 226).

Намагничивающие катушки полюсов изготавливаются из медной изолированной проволоки. После намотки на станке катушки сверху обматываются миткалевой лентой, а затем пропитываются специальным изоляционным составом.

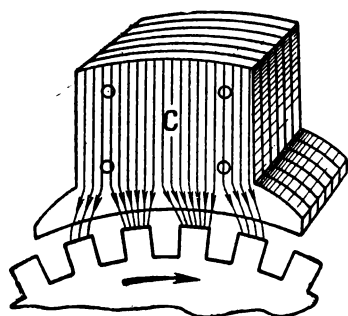


Рис. 226

Все катушки главных полюсов соединяются между собой последовательно и образуют обмотку возбуждения генератора. При пропускании постоянного тока через обмотку в индукторе создается сильное магнитное поле. Силовые линии поля индуктора изображены на рис. 225. Катушки добавочных полюсов также соединяются последовательно (о назначении добавочных полюсов будет сказано позже).

Якорь генератора состоит из стального вала, сердечника, обмотки, коллектора и вентилятора (рис. 227, а). Для уменьшения паразитных токов сердечник якоря делается наборным из отдельных штампованных листов (рис. 227, б) динамной стали толщиной 0,5 мм. На валу сердечник закрепляется шпонкой.

Якорная обмотка изготавливается из медной изолированной проволоки и в пазах сердечника удерживается продольными деревянными клиньями (рис. 227, в). На лобовые соединения обмоток с обеих сторон сердечника накладываются бандажи (рис. 227, а) из стальной проволоки, пропаянной оловом.

Коллектор состоит из отдельных медных пластин (рис. 228, а), которые своими расширенными выступами удерживаются на коллекторной втулке (рис. 228, б) с помощью нажимной шайбы и гайки. Пластины изолированы одна от другой, а также от втулки и шайбы миканитом (тонкие мелкие кусочки слюды, склеенные под давлением шеллачным лаком). В каждой коллекторной пластине имеется продольный паз (шлиц), в который вставляется и затем припаивается оловом короткий проводник (петушок) для присоединения якорной обмотки. Собранный коллектор насаживается втулкой на вал тугой посадкой (под прессом).

Вентилятор (центробежного типа) насаживается на вал с противоположной коллектору стороны и служит для лучшего охлаждения генератора при его работе.

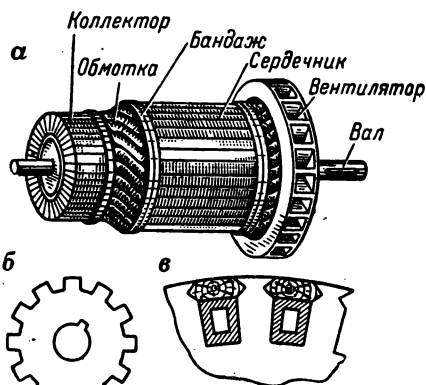


Рис. 227

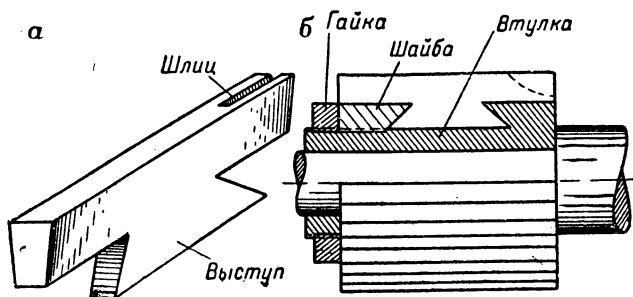


Рис. 228

Кроме главных, у генератора имеются еще вспомогательные части — боковые подшипниковые щиты с шарикоподшипниками и щеточный механизм.

Боковые щиты служат для удержания якоря между полюсами индуктора. Щиты отливаются из чугуна и привинчиваются болтами к станине. Щит со стороны коллектора называется передним, а со стороны вентилятора — задним.

Передний щит (рис. 229, а) намного глубже заднего и на поверхности имеет два окна для доступа к коллектору и щеткам. Сверху на щит надет защитный пояс (рис. 229, б), который предохраняет обслуживающий персонал от прикосновения к токоведущим частям машины и не допускает попадания капель воды в машину сверху. На поясе против окон щита имеются решетки, а в нижней части — вырез по размеру окна. Над решетками пояса прикреплены козырьки, защищающие машину от попадания в нее капель воды.

Задний щит в нижней стенке также имеет узкое окно для вентиляции машины. Окно закрыто решеткой в целях безопасности обслуживающего персонала.

Щеточный механизм состоит из щеточной траверсы, щеток со щеткодержателями и пальцев щеткодержателей.

Щеточная траверса представляет собой разрезное кольцо (рис. 230) со стяжным винтом. По числу главных полюсов на траверсе имеются выступы, к которым привинчиваются пальцы щеткодержателей. У машин типа ПН пальцы выполнены в виде узких текстолитовых пластинок прямоугольного сечения. Траверса надевается на цилиндрический выступ внутри переднего щита и закрепляется на нем стяжным

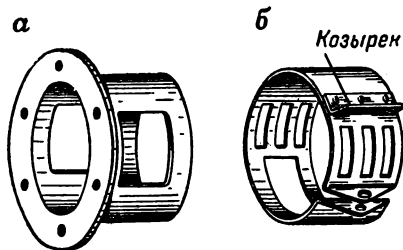


Рис. 229

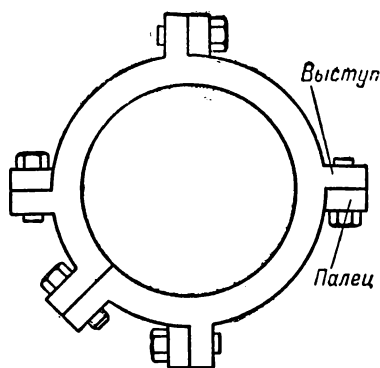


Рис. 230

винтом в нужном положении. Это положение обозначено красными черточками на траверсе и щите.

На каждом пальце укреплен щеткодержатель со щеткой (рис. 231). Щеткодержатели бывают различных конструкций, но все они должны удовлетворять двум основным требованиям: надежно удерживать щетку (без вибрации) и допускать регулировку ее нажима на коллектор. У щеткодержателя, изображенного на рис. 231, нажим регулируется

путем перемещения наружного конца пружины в вырезах боковой стенки.

Щетки выполняются в виде прямоугольных призм и бывают графитовые или угольно-графитовые в зависимости от напряжения и числа оборотов генератора. Каждая щетка имеет гибкий проводничок для соединения с общим выводом генератора (т. е. с плюсом или минусом в зависимости от полярности щеток).

Снаружи станины, в нижней ее части, укреплен щиток из изоляционного материала с выводами всех концов обмоток генератора. Каждый конец подсоединен (с задней стороны щитка) к своему винтовому зажиму. Сверху щиток прикрывается металлической штампованной крышкой.

В верхнюю стенку станины ввинчено кольцо (рис. 224) для удобства перемещения генератора. Против кольца, ближе к переднему щиту, к станине приклепывается прямоугольная металлическая пластинка (паспорт), на которую наносятся

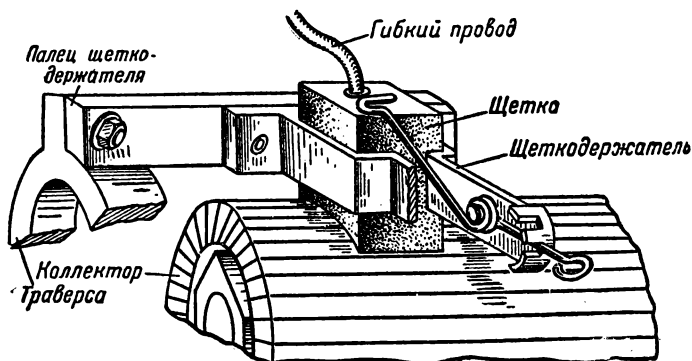


Рис. 231

заводом необходимые эксплуатационные данные генератора (мощность, напряжение и число оборотов).

В зависимости от условий эксплуатации машины постоянного тока выполняются в виде открытых, защищенных, закрытых и герметически закрытых.

Машины открытого типа предназначаются для работы в сухих и чистых помещениях. Передний боковой щит у этих генераторов имеет большие вырезы, благодаря которым щетки и коллектор остаются совершенно открытыми.

К числу генераторов защищенного типа относится рассмотренный нами генератор.

Генераторы закрытого типа, как правило, применяются в передвижных электрических станциях, предназначенных для работы в походных условиях. Окна боковых щитов у этих генераторов снабжаются плотно закрывающимися люками (на войлочных прокладках), которые открываются лишь во время работы станции. При передвижении станций люки обязательно закрываются, чтобы в генератор не попадали пыль и грязь.

Герметически закрытые машины не имеют никаких отверстий на боковых щитах и не пропускают воду. Предназначаются они для работы под водой в течение нескольких часов (двигатели) или в слишком сырых помещениях.

§ 96. ВЫПОЛНЕНИЕ ЯКОРНЫХ ОБМОТОК

Рассматривая работу и назначение коллектора в генераторе постоянного тока, мы лишь вскользь касались вопроса о выполнении якорных обмоток на барабанном якоре, теперь ознакомимся с обмотками несколько подробнее.

Независимо от того, какой якорь используется в генераторе, кольцевой или барабанный, точки стыка или соединения параллельных ветвей якорной обмотки всегда находятся на нейтральной линии. К этим точкам подсоединяются щетки с помощью коллектора при вращении якоря.

Расположение щеток относительно нейтральной линии может быть различным в зависимости от того, к какой коллекторной пластине припаиваются активные стороны витков, расположенных на нейтральной линии.

При кольцевом якоре (рис. 218, а) щетки размещаются на нейтральной линии потому, что каждый виток, проходя через нейтральную линию, оказывается соединенным с коллекторной пластиной, которая также в это время находится на нейтральной линии. Такое соединение витков с коллекторными пластинами (по радиусу) удобно и требует наименьшего количества меди.

В обмотках барабанного якоря щетки целесообразно располагать под серединой полюсов. На рис. 232 приведены раз-

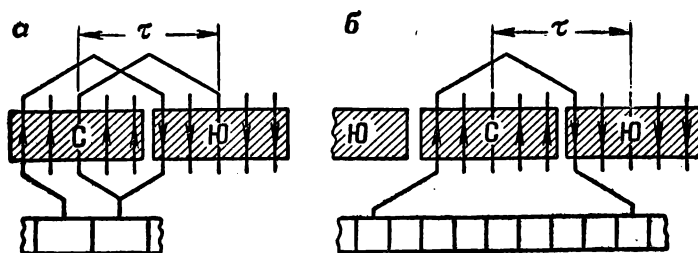


Рис. 232

вернутые схемы обмоток на барабанном якоре. В этих схемах все активные проводники, образующие обмотку и лежащие по одному в пазах якоря, изображены в одной плоскости (поверхности якоря и коллектора как бы разрезаны по образующим и развернуты). Под проводниками показаны полюсы индуктора. Если считать, что проводники движутся влево, то направление электродвижущих сил в них по правилу правой руки будет такое, как показано стрелками.

Для получения замкнутой обмотки проводники необходимо соединить между собой лобовыми соединениями, а чтобы электродвижущие силы в проводниках складывались, их можно соединить по способу петлевой обмотки (рис. 232, а) либо по способу волновой обмотки (рис. 232, б). Эти два типа обмоток и применяются в машинах постоянного тока.

Петлевая обмотка иначе называется параллельной, так как при ней всегда получается столько параллельных ветвей, сколько полюсов в генераторе. Волновая же обмотка называется последовательной, так как при ней независимо от числа пар полюсов можно получить только две параллельные ветви.

Обмотки барабанного якоря называются также шаблонными, потому что их можно изготовлять на станках в виде отдельных одинаковых секций, которые затем укладываются в пазы якоря и соединяются между собой и с коллектором в нужном порядке. Секцией называется наименьшая часть обмотки, присоединенная к двум коллекторным пластинам.

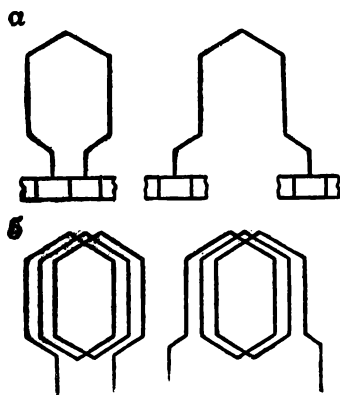


Рис. 233

На рис. 233, а изображены одновитковые секции петлевой и волновой обмоток. Для увеличения электродвижущих сил в параллельных ветвях в каждый паз якоря закладывается по несколько

проводников. В этом случае секции получаются многовитковыми. На рис. 233, б показаны трехвитковые секции тех же двух обмоток.

При расчете обмоток стремятся к тому, чтобы активные стороны секций находились друг от друга на расстоянии, близком к полюсному делению τ , которое измеряется длиной дуги по поверхности якоря между центрами двух соседних полюсов (рис. 232). При этом электродвижущие силы, возникающие в сторонах секций, складываются при любом положении якоря, так как эти стороны проходят всегда под разноименными полюсами. Если

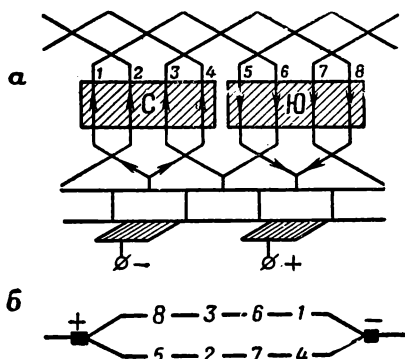


Рис. 234

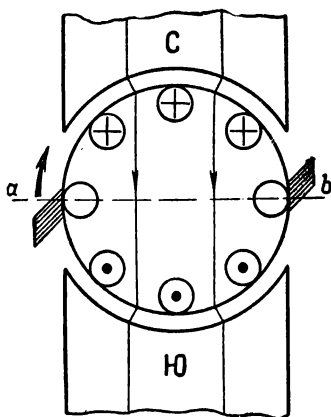


Рис. 235

же секция обеими сторонами попадает в зону одного полюса (или одноименных полюсов), то электродвижущие силы вычитаются.

Правильно рассчитанная обмотка должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Она должна быть замкнутой и содержать все активные проводники.
2. Каждый активный проводник должен присоединяться последовательно только один раз.
3. Электродвижущие силы обмотки в параллельных ветвях должны быть равны при любом положении якоря.

На рис. 234, а приведена полная схема петлевой обмотки двухполюсного генератора, у которого якорь имеет восемь пазов, а в каждый паз заложено по одному активному проводнику. Все активные проводники обмотки занумерованы. В соответствии с этим на рис. 234, б приводится и состав параллельных ветвей для момента времени, когда проводники расположены, как указано на рис. 234, а. Благодаря симметрично выполненным секциям щетки располагаются под серединой полюсов.

В дальнейшем мы будем изображать генератор с барабанным якорем так, как показано на рис. 235, т. е. условно считать, что он не имеет коллектора, а поэтому щетки у него расположены на нейтральной линии и касаются непосредственно активных сторон обмотки. Такое изображение генератора удобно потому, что при нем не требуется вычерчивать коллектор и, следовательно, облегчается рассмотрение того или иного теоретического вопроса.

§ 97. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Под электродвижущей силой генератора следует понимать электродвижущую силу одной параллельной ветви якорной обмотки, так как независимо от числа параллельных ветвей все они подсоединяются к общим зажимам генератора через щетки и коллектор параллельно (рис. 219 и 221).

Если в генераторе увеличивать число параллельных ветвей, то от этого его электродвижущая сила не изменится, зато с каждой новой параллельной ветвью возрастает общая величина тока, отдаваемого генератором во внешнюю цепь, отчего увеличится и полезная мощность генератора.

Выведем формулу для определения величины электродвижущей силы одной параллельной ветви якорной обмотки. Эта формула будет справедлива и для определения величины электродвижущей силы генератора.

Примем следующие обозначения:

- p — число пар главных полюсов индуктора;
- a — число пар параллельных ветвей якорной обмотки;
- N — число активных проводников в обмотке;
- Φ — магнитный поток одного главного полюса в вольт-секундах;
- n — число оборотов якоря в минуту;
- d — диаметр сердечника якоря в метрах;
- l — длина сердечника и длина активного проводника в метрах.

Для электродвижущей силы одной параллельной ветви можно написать

$$E_r = E_{\text{пр}} \frac{N}{2a},$$

где $E_{\text{пр}}$ — электродвижущая сила активного проводника обмотки;

$\frac{N}{2a}$ — число активных проводников в параллельной ветви.

Электродвижущая сила активного проводника может быть определена по формуле

$$E_{\text{пр}} = Blv,$$

где B — магнитная индукция поля в $\frac{\text{вб}}{\text{м}^2}$;

l — длина активного проводника в метрах;

v — скорость движения проводника в метрах в секунду.

В воздушном зазоре генератора магнитная индукция распределяется неравномерно: под полюсами она сильнее, а ближе к нейтральной линии слабее. Поэтому при всех расчетах пользуются средней величиной магнитной индукции, считая, что магнитные потоки всех главных полюсов равномерно распределяются по всей поверхности сердечника якоря. Величина средней магнитной индукции определяется формулой

$$B_{\text{ср}} = \frac{2p\Phi}{\pi dl},$$

где $2p\Phi$ — суммарный магнитный поток главных полюсов;
 πdl — поверхность сердечника якоря.

Подставив значение средней магнитной индукции, а также величину линейной скорости проводника $v = \frac{\pi dn}{60}$ в формулу $E_{\text{пр}} = Blv$, получим

$$E_{\text{пр}} = \frac{2p\Phi}{\pi dl} l \frac{\pi dn}{60},$$

или после сокращения

$$E_{\text{пр}} = \frac{2p\Phi}{60} n.$$

Если теперь подставить полученное значение электродвижущей силы активного проводника в равенство

$$E_r = E_{\text{пр}} \frac{N}{2a},$$

то оно примет такой вид

$$E_r = \frac{2pN}{2a \cdot 60} n\Phi,$$

или после сокращения

$$E_r = \frac{pN}{60a} n\Phi \text{ вольт.} \quad (120)$$

Это и есть формула для определения величины электродвижущей силы генератора постоянного тока. Упрощенно эту формулу обычно пишут так:

$$E_r = cn\Phi,$$

где $c = \frac{pN}{60a}$ — некоторый постоянный коэффициент, зависящий от конструкции машины,

Последняя формула показывает, что при прочих равных условиях электродвижущую силу генератора можно изменять двумя способами: изменением числа оборотов якоря и изменением магнитного потока индуктора. На практике обычно пользуются вторым способом.

§ 98. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ И ТОРМОЗЯЩИЙ МОМЕНТ В ГЕНЕРАТОРАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

До сих пор мы рассматривали генератор в режиме холостого хода и интересовались вопросом получения от него электродвижущей силы неизменного направления. Теперь ознакомимся с процессами, которые происходят в генераторе после включения его под нагрузку.

На холостом ходу в магнитной системе генератора имеется только одно магнитное поле — поле индуктора, которое создается постоянным током, проходящим по обмотке возбуждения. Этот ток поступает в обмотку от постороннего источника тока (например, от аккумуляторной батареи). В параллельных ветвях якорной обмотки возникают лишь электродвижущие силы, которые уравновешивают друг друга, поэтому тока в обмотке нет.

На рис. 236 изображено магнитное поле индуктора, а также показано направление электродвижущих сил в активных проводниках якорной обмотки в соответствии с полярностью полюсов и указанным направлением вращения якоря. Стороны, или края, полюсов индуктора, на которые при вращении якоря как бы набегают активные проводники якорной обмотки, называются набегающими, а противоположные стороны — сбегаящими. При указанном на рис. 236 направлении вращения якоря левый край северного полюса и правый край южного будут набегающими краями.

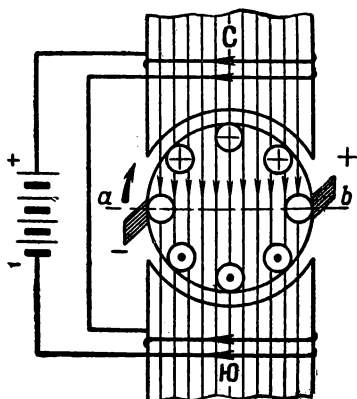


Рис. 236

Поле индуктора на холостом ходу характерно главным образом тем, что его магнитные силовые линии перпендикулярны к нейтральной линии ab . Благодаря такому распределению силовых линий щетки генератора работают без искрения. Объясняется это тем, что хотя каждый виток кольцевого якоря (рис. 237) или секция барабанного якоря при прохождении активными сторонами через нейтральную линию ab и замыкается накоротко щеткой через пластины коллектора, но

в этом нет никакой опасности, так как активные стороны в это время не пересекают магнитных силовых линий («скользят» по ним) и в них не возникает электродвижущих сил. А раз в витке или секции нет электродвижущей силы, то нет и тока в образовавшемся замкнутом контуре, поэтому при разрыве контура, т. е. когда одна из коллекторных пластин (на рис. 237 первая) выходит из-под щетки, никакого искрения не возникает.

Вполне понятно, что если магнитные силовые линии не будут перпендикулярны к нейтрали ab , то щетки станут искрить, так как в секциях, замыкаемых щетками, появятся электродвижущие силы, а значит, и токи вследствие пересечения магнитных силовых линий поля активными сторонами секций. Искрение щеток вызывает порчу коллектора (выгорают пластины) и поэтому не допускается в генераторах.

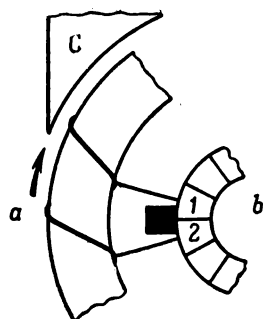


Рис. 237

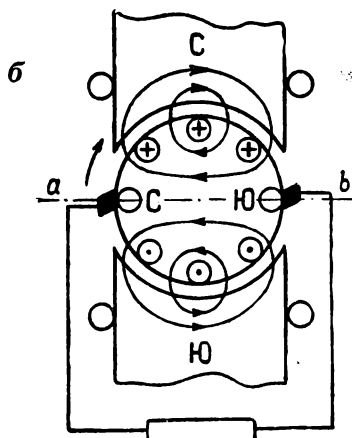
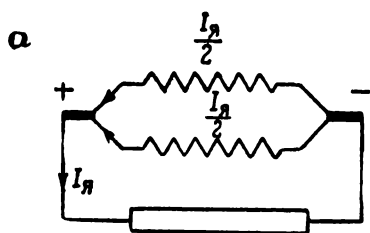


Рис. 238

Если рассматриваемый нами генератор (рис. 236) включить под нагрузку, то у него щетки начнут искрить, причем с увеличением нагрузки искрение будет усиливаться, а после отключения нагрузки прекратится.

Причиной искрения щеток является магнитное поле якоря, которое создается в магнитной системе генератора током якорной обмотки после подключения к ней нагрузки. Распределение тока нагрузки I_a в параллельных ветвях якорной обмотки показано на принципиальной схеме (рис. 238, а). Магнитное поле якоря отдельно изображено на рис. 238, б. На том же рисунке указано направление тока в активных проводниках якорной обмотки. Оно совпадает с направлением электродвижущих сил в этих же проводниках.

Из рис. 238, б видно, что ось магнитного поля якоря

перпендикулярна к оси магнитного поля индуктора. У набегающего края каждого полюса магнитные силовые линии имеют направление, противоположное направлению магнитных силовых линий поля индуктора (ослабляют его), а у сбегающего края — одинаковое направление (усиливают поле индуктора). При сложении двух полей в магнитной системе получается результирующее поле, которое под нагрузкой генератора и создает электродвижущие силы в параллельных ветвях якорной обмотки. Это поле (рис. 239) можно рассматривать как поле индуктора, искаженное в результате воздействия на него поля

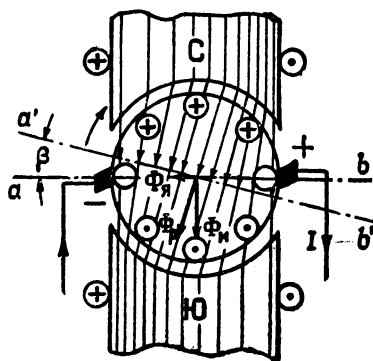


Рис. 239

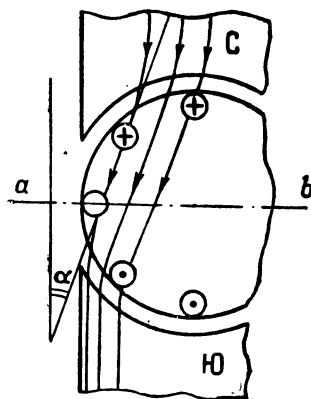


Рис. 240

якоря. Воздействие поля якоря на магнитное поле индуктора называется реакцией якоря в генераторах постоянного тока.

Искажение поля индуктора выражается в том, что оно становится слабее у набегающих краев полюсов и, наоборот, сильнее у сбегающих. Кроме того, и это самое главное, магнитные силовые линии поля уже не остаются перпендикулярными к нейтральной линии ab . Если магнитные потоки полей якоря и индуктора изобразить векторами Φ_i и Φ_a (рис. 239), то геометрическая сумма этих векторов даст вектор Φ_p магнитного потока результирующего поля. Этот вектор, совпадающий по направлению с осью результирующего поля, дает представление о степени искажения поля на нейтральной линии.

Причиной искрения щеток у нагруженного генератора является как раз искажение поля индуктора на нейтральной линии. С увеличением нагрузки генератора искажающее действие поля якоря усиливается (так как поле становится сильнее), поэтому магнитные силовые линии результирующего поля все больше отклоняются от направления, перпендикулярного к нейтральной линии (рис. 240, угол α возрастает с увеличением нагрузки). Из-за возрастающего искажения магнит-

ного поля индуктора электродвижущие силы в закороченных щетками секциях увеличиваются ($E = Blv \sin \alpha$), и это приводит к еще большему искрению щеток.

Из рис. 239 видно, что вследствие искажения магнитного поля индуктора его нейтральная линия сместилась на некоторый угол β по направлению вращения якоря и в своем новом положении $a'b'$ продолжает оставаться перпендикулярной к магнитным силовым линиям искаженного поля. Наличие нейтральной линии в искаженном поле индуктора позволяет очень просто устранить искрение щеток. Для этого достаточно

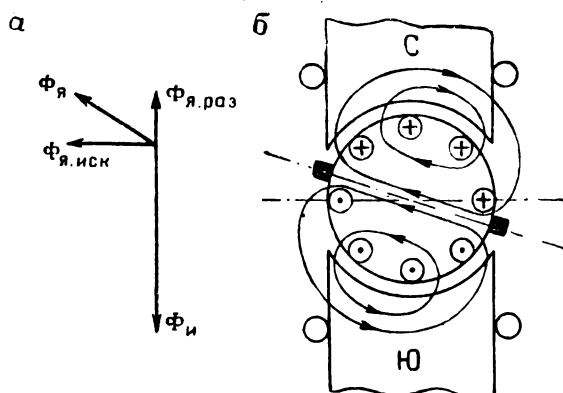


Рис. 241

переместить щетки на новую нейтральную линию $a'b'$ (по ходу вращения якоря), чтобы они опять замыкали секции обмотки в тот момент, когда эти секции не пересекают магнитных силовых линий.

Однако этот способ на практике неудобен тем, что с изменением нагрузки генератора положение щеток все время нужно изменять. Кроме того, со сдвигом щеток на новую нейтраль появляется размагничивающая составляющая у поля якоря (благодаря смещению оси поля), которая ослабляет поле индуктора и, следовательно, уменьшает электродвижущую силу генератора. В наличии размагничивающей составляющей у поля якоря можно убедиться, разложив вектор его потока $\Phi_{\text{я}}$ на две взаимно перпендикулярные составляющие (рис. 241, а): поперечную $\Phi_{\text{я.иск}}$ и продольную $\Phi_{\text{я.раз}}$. Поперечная составляющая вызывает лишь искажение поля индуктора, как и при нормальном положении щеток, а продольная составляющая направлена противоположно полю индуктора и поэтому ослабляет его.

Смещение оси поля якоря на такой же угол, на какой смещаются щетки, объясняется тем, что при смещении щеток из-

меняется расположение параллельных ветвей якорной обмотки в пространстве, а эти ветви своими токами создают магнитное поле якоря (рис. 241, б).

При неизменной нагрузке искрение щеток у некоторых генераторов устраняется путем их перемещения на новую нейтральную линию. Для устранения искрения щеток при любой нагрузке служат добавочные полюсы (рис. 242), расположенные на нейтральной линии. Своим противоположным полем они размагничивают магнитное поле якоря, устраняя тем самым причину, которая вызывает искажение магнитного поля индуктора.

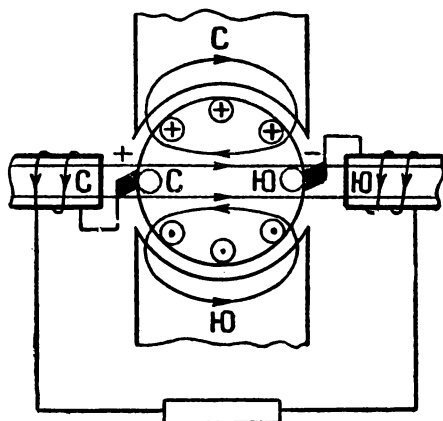


Рис. 242

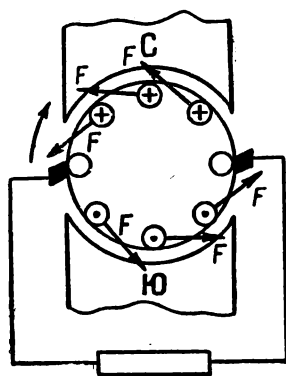


Рис. 243

Для того чтобы размагничивание поля якоря происходило автоматически в соответствии с нагрузкой генератора, обмотка добавочных полюсов включается последовательно с внешней цепью. В машинах малой мощности (до 5 кВт) делается один добавочный полюс (на два главных), достаточный для размагничивания поля якоря.

Мы ознакомились лишь с одним новым явлением, которое происходит в генераторе под нагрузкой. Другое явление заключается в том, что у нагруженного генератора возникает тормозящий момент, который препятствует вращению якоря первичным (механическим) двигателем. В результате такого действия тормозящего момента в генераторе осуществляется превращение механической энергии в электрическую.

Выведем формулу, определяющую величину тормозящего момента в генераторе. Появление тормозящего момента вызывается силами F взаимодействия тока якоря с магнитным полем индуктора. Направление сил, действующих на активные проводники якорной обмотки нагруженного генератора, пока-

зано на рис. 243 (определяется по правилу левой руки). Величину каждой силы можно определить по формуле

$$F = BlI,$$

где B — магнитная индукция поля в $\frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$;

l — длина активного проводника в метрах;

I — величина тока, проходящего по проводнику, в амперах.

В нашем случае ток в каждом активном проводнике равен

$$I = \frac{I_a}{2a},$$

где I_a — полный ток якоря;

$2a$ — число параллельных ветвей в якорной обмотке.

Среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре генератора нам уже известно:

$$B_{cp} = \frac{2p\Phi}{\pi dl}.$$

Подставив значения тока и средней магнитной индукции в формулу для определения силы, получим

$$F = \frac{2pl}{\pi dl \cdot 2a} I_a \Phi,$$

или после сокращения

$$F = \frac{p}{\pi da} I_a \Phi.$$

Зная величину силы, можно определить момент любой пары сил, действующей на два диаметрально противоположных проводника якоря:

$$M_n = Fd.$$

После подстановки в эту формулу значения силы получим

$$M_n = \frac{pd}{\pi da} I_a \Phi,$$

или

$$M_n = \frac{p}{\pi a} I_a \Phi.$$

Полученный нами момент составляет лишь часть тормозящего момента генератора. Таких моментов в генераторе действует $\frac{N}{2}$, где N — число активных проводников в якорной обмотке (момент пары возникает в результате действия сил на два проводника). Для определения полного тормозящего мо-

мента, действующего в генераторе, необходимо моменты всех пар сил сложить, тогда получим

$$M = M_{\text{п}} \frac{N}{2} = \frac{pN}{2\pi a} I_{\text{я}} \Phi,$$

или

$$M = c I_{\text{я}} \Phi, \quad (121)$$

где $c = \frac{pN}{2\pi a}$ — некоторый постоянный коэффициент, зависящий от конструкции генератора.

Из полученной нами формулы следует, что с увеличением тока нагрузки в генераторе увеличивается и тормозящий момент, а это означает, что с увеличением нагрузки к генератору необходимо подводить и больше энергии от механического двигателя для превращения ее в электрическую энергию.

§ 99. ВОЗБУЖДЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Под возбуждением генератора следует понимать создание в нем магнитного потока Φ , необходимого для получения электродвижущих сил в параллельных ветвях якорной обмотки. Так как магнитный поток создается током, проходящим по обмотке возбуждения генератора, то в зависимости от способа питания этой обмотки различают независимое возбуждение и самовозбуждение.

При независимом возбуждении обмотка питается от постороннего источника постоянного тока, а при самовозбуждении — от самого генератора. Первые генераторы были только с независимым возбуждением. Генераторы с самовозбуждением появились несколько позже — в конце 70-х годов прошлого столетия.

Для практики более удобны генераторы с самовозбуждением, как не требующие для своей работы дополнительных источников постоянного тока. Однако в ряде случаев применяются и генераторы с независимым возбуждением (например, когда собственное напряжение генератора нерационально использовать для питания обмотки возбуждения из-за его небольшой величины и т. п.).

Кроме этих двух основных типов генераторов, имеются еще генераторы с постоянными магнитами, у которых магнитный поток создается с помощью сильных постоянных магнитов. Такие генераторы называются магнитоэлектрическими.

Независимое возбуждение генераторов дополнительных пояснений не требует, что же касается генераторов с самовозбуждением, то на них следует остановиться более подробно.

Принцип самовозбуждения генераторов основан на явлении остаточного магнетизма в стальной станине индуктора.

Для создания остаточного магнетизма достаточно лишь один раз пропустить постоянный ток через обмотку возбуждения генератора от постороннего источника тока. Это делается всегда на заводе при контрольном испытании генераторов.

Магнитный поток, вызываемый остаточным магнетизмом, очень небольшой, поэтому при нормальном числе оборотов якоря в его обмотке возникает электродвижущая сила в 7—10 в в зависимости от магнитных свойств стали станины. Однако эта электродвижущая сила все же достаточна для того, чтобы создать хотя бы небольшой ток в обмотке возбуждения, если подключить ее к зажимам $Я_1$ и $Я_2$ якорной обмотки (рис. 244). Выводы обмотки возбуждения подключаются к этим зажимам согласно, т. е. так, чтобы проходящий через нее ток под действием электродвижущей силы, вызываемой остаточным магнетизмом, создавал в магнитной системе генератора поток Φ такого же направления, что и поток остаточного магнетизма $\Phi_{ост}$. На рис. 244 показано согласное подключение обмотки возбуждения. Если выводы обмотки поменять местами, то направление тока в ней изменится на противоположное и генератор будет не подмагничиваться обмоткой, а размагничиваться.

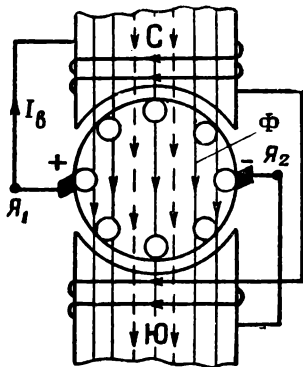


Рис. 244

При условии согласного подключения обмотки процесс самовозбуждения в генераторе сводится к следующему. Проходя по обмотке возбуждения, ток подмагничивает полюсы, т. е. увеличивает магнитный поток Φ в генераторе. Это приводит к возрастанию электродвижущей силы $E = cn\Phi$, которая посылает уже больший ток в обмотку возбуждения, вызывая новое увеличение магнитного потока, и т. д. В течение очень короткого промежутка времени (1—2 сек.) процесс возбуждения прекращается вследствие магнитного насыщения и электродвижущая сила генератора, достигнув определенного значения, в дальнейшем больше не увеличивается (при условии, если число оборотов якоря остается неизменным).

При условии согласного подключения обмотки процесс самовозбуждения в генераторе сводится к следующему. Проходя по обмотке возбуждения, ток подмагничивает полюсы, т. е. увеличивает магнитный поток Φ в генераторе. Это приводит к возрастанию электродвижущей силы $E = cn\Phi$, которая посылает уже больший ток в обмотку возбуждения, вызывая новое увеличение магнитного потока, и т. д. В течение очень короткого промежутка времени (1—2 сек.) процесс возбуждения прекращается вследствие магнитного насыщения и электродвижущая сила генератора, достигнув определенного значения, в дальнейшем больше не увеличивается (при условии, если число оборотов якоря остается неизменным).

В зависимости от способа соединения обмотки возбуждения с внешней цепью генераторы с самовозбуждением бывают трех типов:

1) генераторы с последовательным возбуждением, или серийные генераторы, у которых обмотка возбуждения включается последовательно с внешней цепью;

2) генераторы с параллельным возбуждением, или шунто-

вые генераторы, у которых обмотка возбуждения включается параллельно с внешней цепью;

3) генераторы со смешанным возбуждением, или компаундные генераторы, имеющие две обмотки возбуждения, из которых одна включается последовательно с внешней цепью, а другая — параллельно.

§ 100. ГЕНЕРАТОР С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Эксплуатационные качества каждого генератора определяются прежде всего тем, в какой степени сохраняется у него сравнительное постоянство напряжения при переменной нагрузке без воздействия на величину тока возбуждения. В отношении постоянства напряжения все генераторы оценивают по так называемой внешней характеристике, которая представляет собой кривую зависимости напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при постоянном числе оборотов якоря и неизменном сопротивлении цепи обмотки возбуждения. Исходя из внешней характеристики, мы и будем рассматривать свойства отдельных генераторов.

Электрическая схема генератора с независимым возбуждением изображена на рис. 245, *а*. Якорь генератора на схемах условно обозначается окружностью с двумя щетками и бук-

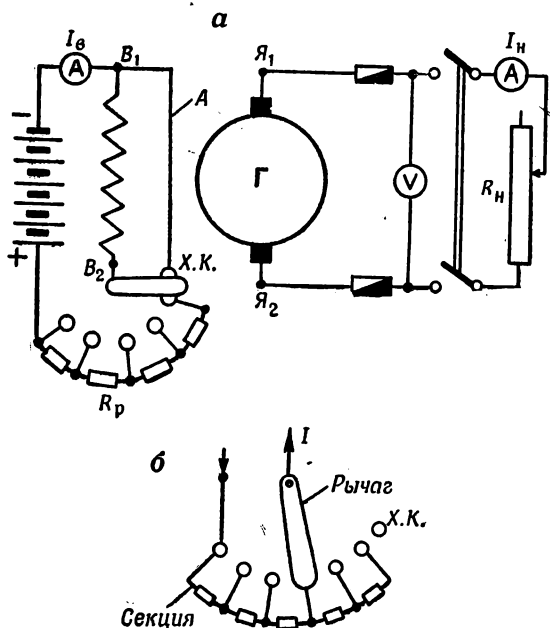


Рис. 245

вой Γ в середине, а обмотка возбуждения — в виде ломаной линии.

Для изменения величины тока в обмотке возбуждения применяются обычно рычажные регулировочные реостаты с холостым контактом, чтобы избежать опасной по величине электродвижущей силы самоиндукции при разрыве цепи обмотки (см. § 51).

Главной частью таких реостатов служит проволока из сплава с высоким сопротивлением, намотанная на фарфоровые трубочки и образующая секции реостата (рис. 245, б). Секции присоединяются к металлическим контактам, укрепленным на крышке реостата, выполненной из изоляционного материала. Один из крайних контактов с секциями не соединяется и служит холостым контактом (Х. К.). Изменение сопротивления в реостате осуществляется поворотом контактного рычага, также укрепленного на крышке. Все части реостата смонтированы в корпусе из листового перфорированного (имеющего отверстия) железа.

Схема включения реостата в цепь обмотки возбуждения генератора изображена на рис. 245, а. Из схемы видно, что перед тем как обмотка возбуждения отсоединяется от источника тока контактным рычагом (при повороте его против часовой стрелки) она при помощи того же рычага, холостого контакта и соединительного провода А замыкается, образуя замкнутый контур. По этому контуру проходит экстраток замыкания, вызываемый электродвижущей силой самоиндукции обмотки. Так как обмотка обладает большим коэффициентом самоиндукции, то и постоянная времени $\tau = \frac{L}{R}$ у нее получается значительной, поэтому скорость изменения экстратока $(\frac{\Delta I}{\Delta t})$ в контуре, а следовательно, и величина электродвижущей силы самоиндукции $e_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$ получаются сравнительно небольшими. Опасность пробоя изоляции обмотки исключается.

Обмотка возбуждения у генераторов выполняется из тонкой изолированной медной проволоки с таким числом витков, чтобы они обеспечили создание необходимого магнитного потока в генераторе. Благодаря большому числу витков ток в обмотке получается не больше 5% номинального тока якоря. При этом и мощность, потребляемая обмоткой, также получается сравнительно небольшой.

Зажимы обмоток обычно обозначаются на щитке буквами Y_1 и Y_2 для якорной обмотки и B_1, B_2 для обмотки возбуждения. При отсутствии букв зажимы обмоток можно определить с помощью аккумуляторной батареи напряжением 5—6 в. Для этого один провод от батареи нужно присоединить к од-

ному из зажимов на щитке, а другим прикасаться (на мгновение) поочередно к остальным зажимам. Тот из зажимов, который даст искру при его касании, будет, очевидно, вторым зажимом обмотки (обмотки в генераторе изолированы одна от другой). Оставшиеся два зажима будут зажимами другой обмотки.

Принадлежность зажимов к той или иной обмотке определяется по силе искры. У якорной обмотки сопротивление незначительно (десятые доли ом), поэтому искра при разрыве этой обмотки получается довольно сильной. У обмотки возбуждения, наоборот, сопротивление большое (от десятков до сотен ом), поэтому искра получается очень незначительной. Якорную обмотку можно определить еще и так. Один провод от батареи присоединить к коллектору, а вторым поочередно касаться зажимов на щитке. Оба якорных зажима при касании их будут искрить, так как они через щетки и якорную обмотку соединяются со всеми коллекторными пластинами.

Опытные данные для построения внешней характеристики генератора получают в следующем порядке.

После подбора необходимых измерительных приборов и реостатов по номинальным данным генератора собирают электрическую схему (рис. 245, *a*) и пускают двигатель для вращения якоря генератора (в лабораторных условиях используется обычно двигатель трехфазного тока). Перед пуском двигателя оба реостата R_p и R_n полностью вводят, т. е. устанавливают их на полные сопротивления.

Постепенно уменьшают сопротивление регулировочного реостата и доводят напряжение на зажимах генератора по вольтметру до величины на 5—10% выше номинальной. Затем включают рубильник и с помощью реостата нагрузки устанавливают номинальный ток. Если при этом напряжение на зажимах генератора не окажется равным номинальному, то, пользуясь обоими реостатами, добиваются номинальных значений как тока нагрузки, так и напряжения на зажимах генератора. В дальнейшем ток во внешней цепи постепенно уменьшают до нуля, вводя сопротивление нагрузочного реостата, и записывают при этом показания вольтметра и амперметра (хотя бы через каждые 0,5 *a*). За время опыта сопротивление реостата в обмотке возбуждения не изменяют и поддерживают неизменным число оборотов якоря.

По полученным данным строят внешнюю характеристику (рис. 246). Из характеристики следует, что напряжение на зажимах генератора при изменении нагрузки также изменяется, причем величина этого изменения ΔU при номинальном токе у генераторов разной мощности колеблется от 5 до 10% (чем меньше генератор, тем процент изменения напряжения

больше). Величину процентного изменения напряжения генератора определяют по формуле

$$\Delta U = \frac{U_{xx} - U_H}{U_H} \cdot 100,$$

где U_{xx} — напряжение холостого хода генератора;
 U_H — номинальное напряжение при полной нагрузке (номинальным током).

Непостоянство напряжения генератора, а стало быть, и его внешняя характеристика объясняются изменением внутреннего падения напряжения $I_a R_a$ в якорной обмотке при всяком изменении нагрузки. Это подтверждается уравнением генераторного режима

$$U = E - I_a R_a.$$

Действительно, при независимом возбуждении электродвижущая сила генератора остается постоянной по величине, так как ток в обмотке возбуждения и число оборотов якоря при опыте не изменяются. Всякое же изменение сопротивления в

цепи нагрузки приводит к изменению тока I_a в якоре, а следовательно, и к изменению внутреннего падения напряжения $I_a R_a$, поэтому напряжение на зажимах генератора также соответственно изменяется (с увеличением тока нагрузки уменьшается, а с уменьшением его, наоборот, увеличивается). Конечно, напряжение на зажимах генератора можно поддерживать постоянным при изменении нагрузки, но для этого нужно непрерывно воздействовать на регулировочный реостат в цепи обмотки возбуждения, что не совсем удобно.

В режиме короткого замыкания ток в якорной обмотке $I_{кз}$ получается очень большим, в несколько раз больше номинального (рис. 246), поэтому этот режим опасен для генератора. В отличие от генераторов с самовозбуждением, генератор с независимым возбуждением допускает плавную регулировку напряжения от нуля до номинального, причем напряжения его всегда получаются одинаково устойчивыми.

Электрическая схема, изображенная на рис. 245, а, позволяет получить данные и для построения характеристики холостого хода генератора. Для этого выключают рубильник нагрузки и полностью вводят регулировочный реостат. Затем реостат постепенно выводят и записывают показания амперметра и вольтметра. По полученным данным строят характери-

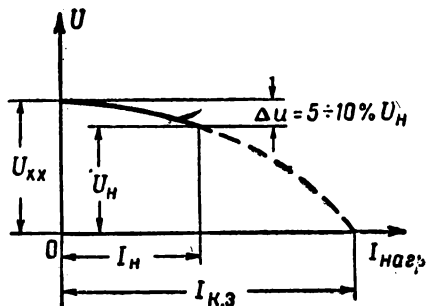


Рис. 246

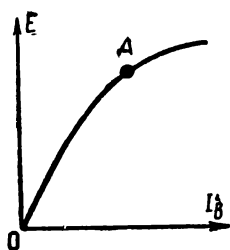


Рис. 247

стику (рис. 247) — кривую зависимости электродвижущей силы генератора от тока возбуждения. Приведенная характеристика представляет собой кривую намагничивания машины, взятую в масштабе вольт ($E \equiv B$). Ценность характеристики в том, что она дает представление о степени насыщения магнитной системы машины.

Генераторы обычно рассчитываются так, чтобы их номинальному напряжению по характеристике холостого хода соответствовала точка А (рис. 247), лежащая в начале области магнитного насыщения. При этом достигаются достаточный предел для рациональной регулировки напряжения (в сторону его повышения от номинального) и более устойчивая работа некоторых генераторов с самовозбуждением, выражающаяся в сохранении сравнительного постоянства напряжения на нагрузках генератора при переменной нагрузке (см. ниже).

§ 101. ГЕНЕРАТОР С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Генератор с параллельным возбуждением (шунтовой генератор) по выполнению своей обмотки возбуждения ничем не отличается от генератора с независимым возбуждением и в случае необходимости может его заменить. Электрическая схема (рис. 248, а) и внешняя характеристика (рис. 248, б) генератора изображены на рис. 248.

Для сравнения на рис. 248, б пунктиром показана и внешняя характеристика того же генератора, но при независимом возбуждении. Порядок снятия внешней характеристики генератора с параллельным возбуждением такой же, как и для генератора с независимым возбуждением, с той лишь разницей, что напряжение на холостом ходу (перед включением рубильника) устанавливается на 10—15% выше номинального. В качестве регулировочного реостата

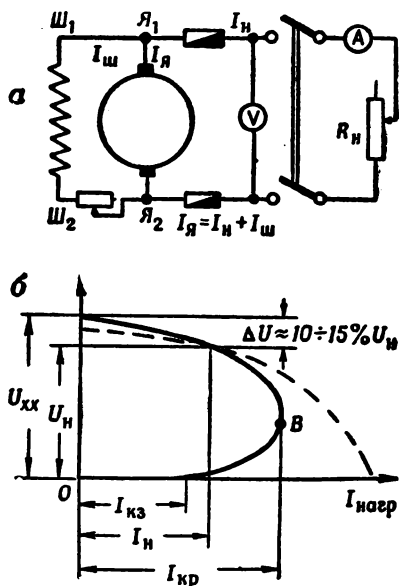


Рис. 248

используют обычный ползунковый реостат, так как цепь обмотки возбуждения (шунтовой обмотки) при остановке генератора не разрывается.

Из внешней характеристики видно, что при переменной нагрузке в пределах номинального тока напряжение генератора с параллельным возбуждением изменяется больше, чем напряжение генератора с независимым возбуждением. Величина процентного изменения напряжения ΔU шунтовых генераторов различной мощности колеблется от 10 до 15%. Объясняется это тем, что у генератора с параллельным возбуждением напряжение на зажимах изменяется не только вследствие изменения внутреннего падения напряжения $I_a R_a$, как у генератора с независимым возбуждением, но и вследствие изменения электродвижущей силы, которая сама зависит от величины генераторного напряжения, посылающего ток в обмотку возбуждения.

Всякое уменьшение напряжения на зажимах генератора из-за возрастания внутреннего падения напряжения при увеличении нагрузки приводит к уменьшению тока возбуждения ($I_b = \frac{U}{R_b}$), а значит, и к уменьшению магнитного потока Φ , от которого электродвижущая сила находится в прямо пропорциональной зависимости ($E = c n \Phi$) при неизменных оборотах.

Зависимость напряжения на зажимах генератора от указанных двух факторов подтверждается и уравнением генераторного режима

$$\begin{array}{ccccccc}
 U & = & E & - & I_a R_a \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 \text{уменьшается} & & \text{уменьшается} & & \text{увеличивается с увеличением нагрузки}
 \end{array}$$

Перегиб на внешней характеристике в точке *В* происходит вследствие различного темпа изменения электродвижущей силы на различных участках характеристики холостого хода.

Из построений, сделанных на рис. 249, видно, что при одинаковом уменьшении тока возбуждения ($\Delta I_{b1} = \Delta I_{b2}$) электродвижущая сила значительно больше уменьшается при отсутствии насыщения (прямолинейный участок характеристики), чем в области магнитного насыщения. Благодаря этому в генераторе происходят следующие явления, если его продолжать нагружать током выше номинального.

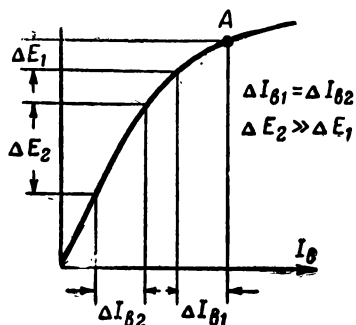


Рис. 249

Пока значения электродвижущей силы находятся близко от точки A (рис. 249), соответствующей расчетному номинальному напряжению генератора, напряжение на зажимах удерживается сравнительно устойчиво и способствует увеличению тока нагрузки. Но как только в магнитной системе машины исчезнут признаки магнитного насыщения, электродвижущая сила резко уменьшится и это приведет к резкому уменьшению напряжения на зажимах генератора. Напряжение начнет падать быстрее, чем уменьшается сопротивление R_n во внешней цепи, поэтому и ток, достигнув некоторого наибольшего значения $I_{кр}$, называемого критическим, начнет уменьшаться. Это подтверждается формулой

$$I = \frac{U}{R_n} \rightarrow \begin{array}{l} \text{уменьшается быстрее, чем } R_n \\ \text{уменьшается} \end{array}$$

При коротком замыкании генератора напряжение на зажимах падает до нуля, поэтому тока в обмотке возбуждения нет ($\Phi = 0$; $E = c n \Phi = 0$). В магнитной системе генератора сохраняется лишь поток остаточного магнетизма, который и наводит в якорной обмотке небольшую электродвижущую силу, поддерживающую в цепи ток короткого замыкания $I_{кз}$. Благодаря небольшой величине электродвижущей силы ($7-10 \text{ в}$) ток короткого замыкания в генераторе будет меньше номинального, поэтому и режим короткого замыкания для генератора безопасен (единственный источник постоянного тока).

Круто спадающая внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением исключает возможность его использования при резко изменяющейся нагрузке. Генератор применяется в тех случаях, когда нагрузка мало изменяется (например, при заряде аккумуляторов) либо допускает изменение напряжения в значительных пределах.

§ 102. ГЕНЕРАТОР СО СМЕШАННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Генератор со смешанным возбуждением (компаундный генератор) (рис. 250) имеет две обмотки возбуждения: параллельную (шунтовую) и последовательную (сериесную).

Намагничивающие катушки последовательной обмотки располагаются на тех же главных полюсах, что и катушки параллельной обмотки.

Если обозначений у зажимов обмоток на щитке нет, то зажимы якорной обмотки нужно определять через коллектор (§ 100), так как последовательная обмотка имеет примерно одинаковое сопротивление с ней и при разрыве под током тоже дает сильную искру.

Обе обмотки возбуждения в генераторе включаются согласно, т. е. создают в магнитной системе потоки одинакового направления, поэтому для результирующего магнитного потока Φ_p можно написать

$$\Phi_p = \Phi_{\text{ш}} + \Phi_{\text{с}},$$

где $\Phi_{\text{ш}}$ и $\Phi_{\text{с}}$ — соответственно потоки, создаваемые параллельной и последовательной обмотками.

Результирующий магнитный поток и определяет собой величину электродвижущей силы генератора под нагрузкой ($E = c n \Phi_p$).

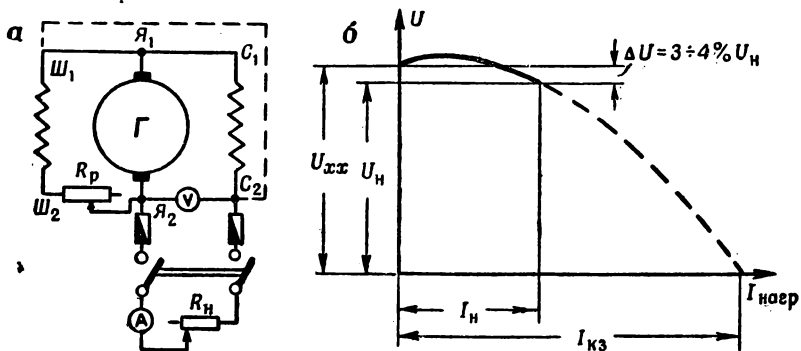


Рис. 250

Различают схему генератора с коротким и длинным шунтами. В первом случае параллельную обмотку подключают к зажимам якоря, а во втором случае — к зажимам генератора, к которым подключается и приемник (внешняя цепь). Подключение параллельной обмотки по схеме длинного шунта на рис. 250, а показано пунктиром. О преимуществах этой схемы будет сказано ниже.

Благодаря наличию последовательной обмотки напряжение на зажимах генератора при переменной нагрузке изменяется значительно меньше, чем у других генераторов, поэтому иногда говорят, что генератор со смешанным возбуждением обладает жесткой внешней характеристикой. Как видно из рис. 250, б, эта характеристика на рабочем участке (т. е. в пределах номинального тока) представляет собой слегка изогнутую прямую линию.

Проследим, что происходит в генераторе со смешанным возбуждением при переходе его из режима холостого хода в режим нагрузки. На холостом ходу магнитный поток в индукторе создается только параллельной обмоткой (при схеме с коротким шунтом); поток от действия последовательной обмотки равен нулю, так как по ней ток не проходит (при схеме с длинным шунтом проходит небольшой ток параллельной об-

мотки). Стоит только включить внешнюю цепь, как последовательная обмотка введется в действие и создаст в индукторе дополнительный магнитный поток, поддерживая этим постоянство напряжения на зажимах генератора.

Действительно, с ростом нагрузки увеличивается внутреннее падение напряжения в якоре $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$, отчего напряжение, а следовательно, и электродвижущая сила при отсутствии последовательной обмотки уменьшались бы, как у генератора с параллельным возбуждением. Последовательная обмотка, вызывая своим током увеличение электродвижущей силы в генераторе, как бы компенсирует этим внутреннее падение напряжения в обмотке якоря, в результате чего напряжение на зажимах генератора, как это следует из уравнения $U = E - I_{\text{я}}R_{\text{я}}$, не уменьшается. Можно сказать, что последовательная обмотка в генераторе со смешанным возбуждением служит своеобразным регулятором постоянства его напряжения.

Расчетом магнитной системы, а также подбором соотношения между ампер-витками (AW) последовательной и параллельной обмоток генератора достигают незначительного процентного изменения напряжения, не превышающего 3—4%. При малых нагрузках из-за отсутствия в машине магнитного насыщения электродвижущая сила, создаваемая последовательной обмоткой, увеличивается больше, чем внутреннее падение напряжения, вызываемое током нагрузки, поэтому напряжение на зажимах генератора даже несколько повышается относительно напряжения холостого хода (рис. 250, б). Однако с ростом нагрузки по мере перехода машины в область магнитного насыщения действие последовательной обмотки начинает ослабляться, в результате чего напряжение на зажимах плавно понижается.

При нагрузках, превышающих номинальную, нарастание электродвижущей силы настолько незначительно по сравнению с нарастанием внутреннего падения напряжения, что напряжение на зажимах резко уменьшается и при коротком замыкании доходит до нуля. Величина тока короткого замыкания в генераторе зависит от способа подключения параллельной обмотки. Меньший ток получается при схеме с длинным шунтом, когда параллельная обмотка не участвует в создании электродвижущей силы в режиме короткого замыкания, так как получает нулевое напряжение. При коротком же шунте эта обмотка находится под напряжением, равным падению напряжения на последовательной обмотке ($U_c = I_{\text{кз}}R_c$), поэтому создает в индукторе дополнительный магнитный поток, увеличивая электродвижущую силу генератора, а значит, и ток короткого замыкания. Конечно, в обоих случаях ток короткого замыкания больше номинального и, следовательно, опасен для генератора, однако при длинном шунте он вызывает менее

тяжелые последствия в случае, если не срабатывает защита (предохранители).

Меньшая величина тока короткого замыкания при схеме с длинным шунтом является одним из преимуществ этой схемы по сравнению со схемой короткого шунта. Другое преимущество схемы заключается в том, что при ней ток параллельной обмотки проходит через последовательную обмотку и способствует, таким образом, усилению результирующего магнитного потока, что в свою очередь приводит к увеличению электродвижущей силы генератора, компенсирующей внутреннее падение напряжения при нарастании тока нагрузки.

Свойство генератора со смешанным возбуждением сохранять сравнительное постоянство напряжения на зажимах дает возможность широко использовать его при резко изменяющейся нагрузке.

В случае несогласного включения последовательной обмотки напряжение на зажимах генератора резко падает при включении нагрузки (последовательная обмотка ослабляет поток параллельной обмотки), поэтому генератор необходимо остановить, переключить концы последовательной обмотки и пустить вновь.

§ 103. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Магнитоэлектрические генераторы отличаются от обычных генераторов постоянного тока простотой конструкции. У них нет обмотки возбуждения и добавочных полюсов, щеточный механизм также значительно упрощен (щетки со щеткодержателями укреплены прямо на подшипниковом щите).

Магнитное поле в генераторах создается сильными постоянными магнитами, обычно подковообразной формы, со стальными полюсными наконечниками (рис. 251). В Советском Союзе первые магнитоэлектрические генераторы были изготовлены в 1934 году. Их мощность была 60 вт, и использовали они для электрического освещения на тракторах. Постоянные магниты генераторов изготавливались из алюминий-никелевой стали с высокой остаточной магнитной индукцией.

Основной недостаток генераторов заключается в том, что они изготовляются на мощность всего в десятки ватт (при больших размерах трудно создать требуемую магнитную индукцию) и, кроме того, они нормально работают только при неизменной нагрузке, так как при переменной нагрузке вследствие отсутствия добавочных полюсов у них начинается искрение щеток.

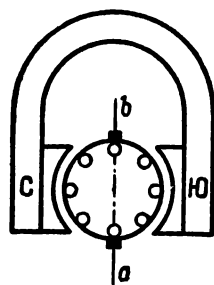


Рис. 251

Характерной особенностью генераторов является постоянство магнитного потока, благодаря чему электродвижущая сила в якорной обмотке строго пропорциональна числу оборотов якора. Эта особенность генераторов используется для измерения оборотов вращающихся валов двигателей, машин, механизмов и т. п., для чего шкалу вольтметра, присоединенного к зажимам генератора, градуируют непосредственно в оборотах якора. После градуировки вольтметра достаточно вал генератора соединить с любым вращающимся валом, чтобы по вольтметру определить число его оборотов в минуту.

Магнитоэлектрический генератор, используемый для измерения оборотов, вместе с отградуированным вольтметром называется электрическим тахометром или тахогенератором. Генераторы используются также в мегомметрах в качестве источников тока и в других аналогичных случаях, когда от источника постоянного тока не требуется большой мощности.

§ 104. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Каждый генератор постоянного тока можно рассматривать как усилитель мощности, потому что мощность, снимаемая с зажимов якора, значительно больше той мощности, которая подводится для питания обмотки возбуждения. Однако при этом не следует забывать, что мощность в генераторе возникает за счет энергии первичного двигателя, вращающего якорь, а с помощью обмотки возбуждения можно лишь управлять этой мощностью, т. е. изменять ее величину в определенных пределах и в нужные моменты времени.

Усилительные свойства генератора постоянного тока характеризуются коэффициентом усиления по мощности

$$K_y = \frac{P_y}{P_v} = \frac{U_y I_y}{U_v I_v}, \quad (122)$$

где $P_y = U_y I_y$ — мощность, снимаемая с зажимов якора внешней цепью;

$P_v = U_v I_v$ — мощность, подводимая к обмотке возбуждения.

Коэффициент усиления различных генераторов зависит от магнитных свойств стали, из которой выполняются магнитные системы, а также от конструктивных особенностей генераторов и лежит в пределах 20—50. Чем выше коэффициент усиления генератора, тем большей мощностью можно управлять, подводя небольшую мощность к обмотке возбуждения.

Изменением мощности, снимаемой с якора, на практике осуществляется управление электрическими двигателями, вращающими те или иные машины, механизмы, станки. Поэтому чем меньше мощность, подводимая к обмотке возбуждения, тем меньших размеров получаются приборы управления (регулирующие реостаты, рубильники, переключатели), тем

меньше в них расходуется энергии и тем удобнее осуществляется само управление (кнопки вместо громоздких рубильников и переключателей).

Обычные генераторы не используются в качестве усилителей мощности по двум причинам: во-первых, из-за низкого коэффициента усиления, а во-вторых (и это самое главное), потому, что само управление проходит сравнительно медленно из-за большой постоянной времени обмотки возбуждения

$$\tau = \frac{L}{R}, \quad (123)$$

где L — коэффициент самоиндукции обмотки в генри;
 R — сопротивление обмотки в омах.

В табл. 14 приводятся значения постоянной времени для отдельных машин разной мощности.

Таблица 14
**Значения постоянной времени для
генераторов разной мощности**

Мощность генераторов, <i>квт</i>	Постоянная времени, сек.
1,5	0,2
15	0,8
75	1,2
3500	2—4

Так как неустановившиеся режимы при включении и выключении цепей с L и R длятся в течение времени 5τ , то, как следует из таблицы, в генераторе малой мощности (1,5 *квт*) на это потребуется не менее одной секунды, а в мощных генераторах — 10—20 сек. Такая продолжительность неустановившихся режимов в целом ряде производственных процессов, а также в работе специальных приборов недопустима.

Оба эти недостатка обычных генераторов устранены в электромашинном усилителе (амплидине). У электромашинных усилителей некоторых конструкций постоянная времени не превышает 0,05 сек., а коэффициент усиления доходит до 10 000. При таком высоком коэффициенте усиления достаточно изменить мощность в обмотке возбуждения на 0,1 *вт*, чтобы в цепи, питаемой электромашинным усилителем, мощность изменилась на 1 *квт*.

По своему устройству электромашинный усилитель отличается от обычных генераторов главным образом индуктором.

Индуктор состоит из корпуса с приварными лапами и запрессованной в него станины с обмотками. Станина составляет одно целое с полюсами (рис. 252) и для уменьшения вихревых токов, а также для ослабления остаточного магнетизма наби-

рается из отдельных штампованных листов мягкой динамной стали. Полюсы станины значительно шире, чем у обычного генератора, и имеют продольные пазы на полюсных наконечниках для укладки в них обмоток (возбуждения, добавочных полюсов, компенсационной и размагничивающей). Число полюсов обычно не более двух. Обмотка возбуждения состоит из небольшого количества витков, но имеет большое сопротивление

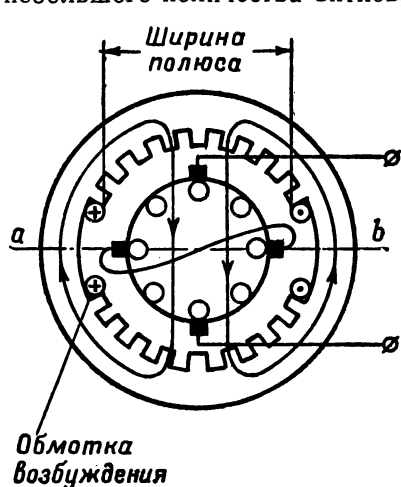


Рис. 252

(для уменьшения постоянной времени). Электромашинные усилители имеют иногда несколько самостоятельных обмоток возбуждения (до четырех), называемых также обмотками управления.

На рис. 252 обмотка возбуждения условно показана расположенной в широком пазу станины для удобства изображения магнитных полей усилителя (см. рис. 253).

Якорь электромашинного усилителя обычный. Воздушный зазор между сердечником якоря и полюсными наконечниками делается как можно меньше (0,2—0,3 мм).

На коллекторе имеются две пары щеток (рис. 252), одна из которых расположена нормально, т. е. так, как у обычных генераторов (щетki соединяются с активными проводниками якорной обмотки, проходящими через нейтральную линию *ab*), а другая — перпендикулярно к нейтральной линии, как показано на рис. 252 (для простоты будем считать, что щетки непосредственно касаются проводников якорной обмотки). Первая пара щеток замкнута накоротко проводником малого сопротивления, а ко второй паре подключается внешняя цепь (нагрузка).

Возбуждение у электромашинных усилителей независимое, ток в обмотки возбуждения поступает из цепи управления от источника постоянного тока. При небольших мощностях (1,5—2 кет) электромашинный усилитель и вращающий его двигатель (обычно трехфазного тока) выполняются в общем корпусе и имеют общий вал.

Электрические данные некоторых типов электромашинных усилителей приводятся в табл. 15.

Главное отличие электромашинных усилителей от обычных генераторов в том, что у них поле якоря используется в качестве основного поля для получения электродвижущих сил

Таблица 15

Электрические данные некоторых типов электромашинных усилителей

Тип амплитудина	Мощность, квт	Напряжение, в	Ток, а	К. п. д.	Обмотки управления				
					число обмоток	сопротивление об- моток, ом	ток, ма	мощность, вт	K_y
ЭМУ-0,3П . . .	0,3	60	5,7	0,65	2	1300	10	0,13	2300
ЭМУ-5,0 . . .	5,0	230	21,7	0,85	4	100	150	0,83	6000

в самой же якорной обмотке. Происходит это так. При пропуске незначительного тока через обмотку управления в параллельных ветвях якорной обмотки возникают также небольшие электродвижущие силы (под действием слабого магнитного потока Φ_y). Эти электродвижущие силы вызывают большие токи в параллельных ветвях, так как ветви замкнуты накоротко проводником, соединяющим нормально расположенные щетки.

Благодаря большим токам в параллельных ветвях, а также вследствие наличия у индуктора широких полюсов и незначительного воздушного зазора между сердечником и полюсами в магнитной системе электромашинного усилителя создается сильное поперечное поле якоря $\Phi_{я1}$ (рис. 253). Так как это поле в пространстве остается неподвижным, а якорь вращается, то в его обмотке под действием поля индуцируются электродвижущие силы точно так же, как и под действием неподвижного магнитного поля индуктора.

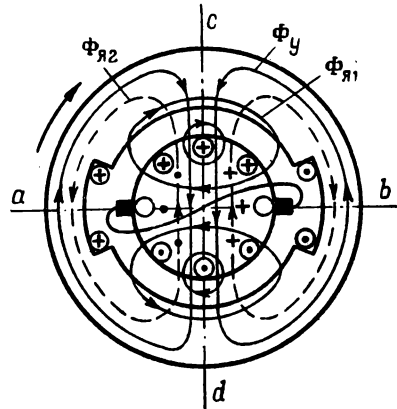


Рис. 253

Следовательно, поле якоря своей нейтральной линией cd также разбивает якорную обмотку на две параллельные ветви, называемые вертикальными, в которых индуцируются равные по величине, но противоположные по направлению электродвижущие силы. Для использования этих электродвижущих сил и служит другая пара щеток, расположенных на нейтральной линии cd . Направления электродвижущих сил в вертикальных параллельных ветвях на рис. 253 указаны крестиками и точками рядом с активными проводниками якорной обмотки

(направления определяются по правилу правой руки для принятого по рисунку направления вращения якоря).

Однако стоит только к щеткам подключить внешнюю цепь, как в вертикальных параллельных ветвях появятся токи и создадут продольное поле якоря $\Phi_{я2}$, перпендикулярное к поперечному полю и направленное противоположно по отношению к магнитному полю индуктора (на рис. 253 силовые линии продольного поля обозначены пунктиром). Вследствие такого направления продольного поля оно размагничивает полюсы индуктора при незначительных токах в цепи нагрузки, поэтому возбуждение электромашинного усилителя, т. е. создание в нем основного (поперечного) поля якоря, становится невозможным (напряжение на вертикальных щетках падает до нуля).

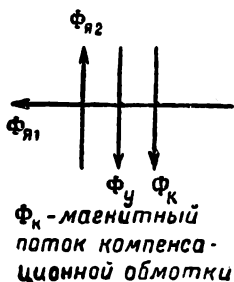


Рис. 254

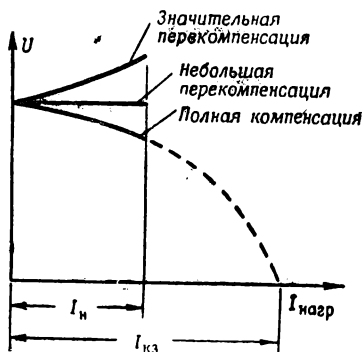


Рис. 255

Для устранения размагничивающего действия продольного поля якоря служит компенсационная обмотка, которая включается последовательно с внешней цепью и создает магнитное поле (Φ_k), направленное противоположно продольному полю якоря. Действие компенсационной обмотки аналогично действию добавочных полюсов в обычных генераторах.

На рис. 254 изображены векторами магнитные потоки всех полей, возникающих в электромашинном усилителе. В зависимости от величины магнитного потока, создаваемого компенсационной обмоткой, магнитный поток обмотки управления либо усиливается, когда $\Phi_k > \Phi_{я2}$ (перекомпенсация), либо ослабляется, когда $\Phi_k < \Phi_{я2}$ (недокомпенсация), либо, наконец, остается без изменения, когда $\Phi_k = \Phi_{я2}$ (полная компенсация). Различным соотношениям между потоками Φ_k и $\Phi_{я2}$ соответствуют и разные внешние характеристики электромашинного усилителя, как это показано на рис. 255. Таким образом, изменением магнитного потока компенсационной обмотки можно получить любую внешнюю характеристику электромашинного усилителя. На практике изменение магнитного

потока Φ_k осуществляется при помощи регулировочного релостата, включенного параллельно с компенсационной обмоткой.

Величина напряжения на зажимах электромашинного усилителя регулируется изменением тока в обмотке управления. Для изменения знака напряжения (т. е. полярности зажимов амплитудина) достаточно изменить направление тока в этой же обмотке.

Для устранения искрения вертикальных щеток средние выступы полюсных наконечников используются в качестве добавочных полюсов. Обмотка этих полюсов, как и в обычных генераторах, включается последовательно с внешней цепью усилителя.

У горизонтальных щеток искрения нет. Объясняется это тем, что на нейтральной линии ab магнитное поле практически отсутствует вследствие значительного воздушного зазора между якорем и станиной (магнитные силовые линии замыкаются через полюсы).

В отличие от генераторов с самовозбуждением электромашинный усилитель не должен иметь остаточного магнетизма в станине индуктора, что, однако, практически неосуществимо. Такое требование к усилителю объясняется тем, что при наличии остаточного магнетизма усилитель возбуждается при отсутствии тока в управляющей обмотке, а это совершенно недопустимо и особенно при автоматическом управлении двигателем, питающимся от усилителя (режимы работы двигателя не будут соответствовать тем сигналам в виде импульсов тока, которые поступят в обмотку возбуждения усилителя от управляющего устройства). Устранение отмеченных последствий достигается размагничивающей обмоткой, которая для этой цели питается переменным током. Размагничивающая обмотка создает переменный магнитный поток в станине усилителя и этим значительно ослабляет поток остаточного магнетизма.

Расположение катушек всех рассмотренных обмоток в пазах одного из полюсов усилителя показано на рис. 256. Для упрощения чертежа каждая катушка изображена в виде одного витка. Катушки одноименных обмоток обоих полюсов соединяются между собой последовательно.

Полная электрическая схема электромашинного усилителя



Рис. 256

изображена на рис. 257; размагничивающая обмотка на схемах обычно не показывается.

В электромашинном усилителе осуществляется двойное усиление на протяжении двух следующих один за другим этапов. На первом этапе мощность $P_{\text{в}} = U_{\text{в}} I_{\text{в}}$, подводимая к обмотке возбуждения, усиливается до мощности $P_{\text{я}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}}$, расходуемой в короткозамкнутой якорной обмотке (на создание поперечного поля якоря), при этом коэффициент усиления

$$K_1 = \frac{P_{\text{я}}}{P_{\text{в}}}.$$

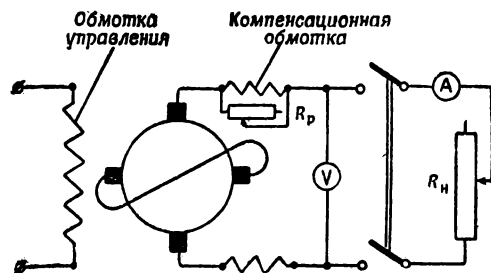


Рис. 257

На втором этапе мощность, расходуемая в якорной обмотке, усиливается до мощности $P_{\text{н}} = U_{\text{н}} I_{\text{н}}$, отдаваемой электромашинным усилителем во внешнюю цепь; при этом коэффициент усиления

$$K_2 = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{я}}}.$$

Произведение коэффициентов усиления $K_1 K_2$ дает общий коэффициент усиления электромашинного усилителя

$$K = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{в}}} = K_1 K_2 = \frac{P_{\text{я}} P_{\text{н}}}{P_{\text{в}} P_{\text{я}}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{в}}}.$$

§ 105. ПОТЕРИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ

Механическая энергия, подводимая к генератору от первичного двигателя, неполностью преобразуется в электрическую, так как часть ее расходуется в виде потерь в самом генераторе. Эти потери энергии или мощности (если отнести энергию потерь к единице времени) происходят в любой электрической машине как постоянного, так и переменного токов независимо от того, работает она в качестве генератора или двигателя.

В соответствии с причинами, вызывающими потери, различают:

а) электрические потери, или потери в меди P_m , обусловленные выделением тепла во всех токоведущих частях машины (в обмотках, щетках, коллекторе, соединительных проводах);

б) магнитные потери, или потери в железе $P_{ж}$, вызываемые вихревыми токами (в сердечнике якоря и полюсных наконечниках) и гистерезисом (в сердечнике якоря);

в) механические потери $P_{мех}$, вызываемые силами трения в различных частях машины при вращении якоря (в подшипниках, между щетками и коллектором, между якорем и воздухом).

Все указанные потери в конечном итоге переходят в тепловую энергию и вызывают нагрев электрической машины.

Для определения мощности потерь в меди достаточно знать сопротивление всех обмоток и величины токов в них (сопротивления обмоток всегда можно измерить, номинальные значения токов указываются заводом). Зная эти данные, вычисляют мощность потерь каждой обмотки по формуле

$$P = I^2 R,$$

а затем результаты складывают.

Для шунтового генератора, например, мощность потерь в меди

$$P_m = I_a^2 R_a + I_{ш}^2 R_{ш},$$

где I_a и $I_{ш}$ — номинальные токи якорной и шунтовой обмоток;

R_a и $R_{ш}$ — сопротивления обмоток.

В сопротивление якорной обмотки при его измерении входит и сопротивление щеток, а также сопротивление обмотки добавочных полюсов.

Сложнее дело обстоит с потерями в железе и с механическими потерями. Их можно вычислить лишь по приближенным эмпирическим формулам. Так, для определения магнитных потерь при толщине листов в 0,5 мм пользуются формулой

$$p_{ж} = \left[4,4 \frac{f}{100} + 5,6 \left(\frac{f}{100} \right)^2 \right] \left(\frac{B}{10000} \right)^2 \frac{\text{ватт}}{\text{килограмм}},$$

где $f = \frac{pn}{60}$ — частота перемагничивания в герцах;

B — магнитная индукция поля в $\frac{\text{в-сек}}{\text{м}^2}$.

Потери мощности на трение в подшипниках вычисляют по другой формуле

$$p_{тр} = 9,81 K_r F v \text{ ватт}, \quad (124)$$

где F — давление цапф вала якоря на подшипник в килограммах;

K_r — коэффициент трения;

v — окружная скорость цапф в метрах в секунду.

Пользование этими формулами затруднительно (необходимо знать величину магнитной индукции, а также коэффициент трения), поэтому ими пользуются обычно для ориентировочных расчетов при проектировании электрических машин.

Потери в железе и механические потери очень мало изменяются при различных нагрузках, так как число оборотов генератора и магнитная индукция в его магнитной системе остаются почти постоянными. Потери же в меди, за исключением потерь в шунтовой обмотке, изменяются пропорционально квадрату тока нагрузки генератора (потери в шунтовой обмотке изменяются незначительно).

О величине и соотношении потерь в генераторах разной мощности дает представление табл. 16.

Таблица 16

Потери в генераторах разной мощности

Вид потерь	Мощность P 0,5—2 квт	Мощность P 50—100 квт	Мощность P 300—600 квт
	потери в % от номинальной мощности генератора		
В железе	4—10	2—4,5	1,5—3
В обмотке якоря . . .	4—10	2—4,5	1,5—3
В обмотке возбуждения	3—10	1—3	0,7—2,5
Механические потери	3—6	2—4	0,5—1

Из этой таблицы видно, что с увеличением мощности генераторов потери в них уменьшаются в процентном отношении, поэтому гораздо экономичнее использовать более мощные генераторы.

Распределение поступающей в генератор механической мощности поясняет диаграмма, изображенная на рис. 258. Из этой диаграммы видно, что произведение электродвижущей силы на ток якоря $P_{эл} = EI_{я}$, т. е. полная электрическая мощность генератора, меньше механической мощности $P_{подв}$ на величину потерь в железе и механических потерь. Электрическая мощность за вычетом потерь в меди дает полезную мощность генератора, которая потребляется его приемниками. Величина полезной мощности определяется формулой

$$P = U_n I_n,$$

где U_n и I_n — номинальные значения тока и напряжения генератора.

Механическая мощность, которая сообщается генератору со стороны вращающего его двигателя, называется также подведенной мощностью.

Генератор постоянного тока принято характеризовать двумя коэффициентами полезного действия: электрическим $\eta_{эл}$

и промышленным $\eta_{\text{пр}}$. Электрический коэффициент учитывает только потери в меди

$$\eta_{\text{эл}} = \frac{P}{P_{\text{эл}}} \cdot 100 = \frac{U_{\text{н}} I_{\text{н}}}{E I_{\text{н}}} \cdot 100 = \frac{U_{\text{н}} I_{\text{н}}}{U_{\text{н}} I_{\text{н}} + p_{\text{м}}} \cdot 100.$$

Промышленный коэффициент учитывает все потери. Он равен отношению полезной мощности генератора к подведенной:

$$\eta_{\text{пр}} = \frac{P}{P_{\text{подв}}} \cdot 100 = \frac{U_{\text{н}} I_{\text{н}}}{U_{\text{н}} I_{\text{н}} + \sum p} \cdot 100, \quad (125)$$

где $\sum p = p_{\text{м}} + p_{\text{ж}} + p_{\text{мех}}$ — сумма потерь в генераторе.

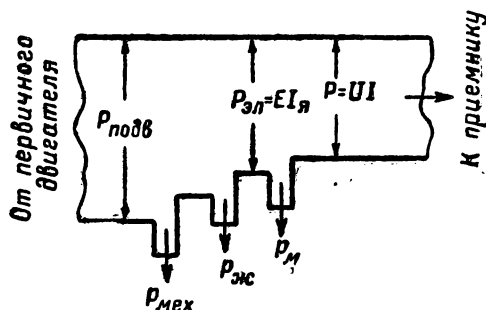


Рис. 258

Для машин различной мощности при полной нагрузке промышленный к. п. д. колеблется от 70 (для машин малой мощности) до 96% (для мощных машин). Высокий промышленный к. п. д. генераторов свидетельствует об их превосходстве перед другими установками, преобразующими энергию. У паровых двигателей, например, к. п. д. в лучшем случае доходит до 15%, а у двигателей внутреннего сгорания он не превышает 40%.

§ 106. НАГРЕВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И НОРМЫ НАГРЕВА

Каждая электрическая машина рассчитывается на определенный режим работы, который характеризуется некоторой допустимой температурой нагрева ее частей, а также номинальными данными токов и напряжений обмоток. Наибольшая допустимая температура нагрева машины определяется классом изоляции ее обмоток, как это видно из табл. 17.

Нагрев любой машины вследствие возникающих в ней потерь происходит постепенно и прекращается по достижении теплового баланса, при котором в каждый момент времени все тепло, выделяемое машиной, отводится в окружающую среду. В зависимости от конструктивных особенностей электрических машин температурный баланс в них наступает через 2—4 часа

Наибольшая допустимая температура нагрева машин

Класс изоляции	Род обмотки	Наибольшая допустимая температура, °C	Примечание
Класс О — не пропитанные и не погруженные в масло волокнистые материалы	Все обмотки на вращающихся и неподвижных частях машины	80	
Класс А — пропитанные или погруженные в масло волокнистые материалы	То же	95	
Класс В — препараты из слюды, асбеста и других материалов со связывающими их веществами	"	115	
Класс С — слюда без связывающих материалов, фарфор, стекло и др.	"	—	Изоляция класса С ограничена таким нагревом, при котором температура соседних частей, а также превышение температуры не превосходят допустимых для этих частей пределов

после начала работы на полную номинальную мощность. Наибольшая температура нагрева машины по достижении в ней теплового баланса зависит от температуры окружающей среды. Чем ниже эта температура, тем лучше условия охлаждения машины, поэтому она меньше нагревается. С увеличением температуры окружающей среды условия охлаждения, наоборот, ухудшаются и машина начинает нагреваться сильнее при тех же самых потерях в ней.

По нормам, принятым в СССР, все наши электрические машины рассчитывают таким образом, чтобы они развивали указанную для них заводом номинальную мощность при температуре окружающей среды 35°С. При такой температуре любой генератор должен работать как угодно длительно на полную мощность и ни в одной своей точке не перегреться выше температуры, которая допускается классом изоляции его обмоток.

Если температура среды выше 35°С, необходимо снизить мощность потерь в генераторе, чтобы не допустить его перегрева. Это можно сделать только путем снижения потерь

в меди за счет уменьшения полезной мощности генератора. При температуре окружающей среды ниже 35°C от генератора можно получить мощность даже больше номинальной.

Таким образом, номинальная мощность любой электрической машины — величина непостоянная и зависит от условий охлаждения. Машины, предназначенные для продолжительной работы, должны выдерживать в нагретом состоянии кратковременные перегрузки на 50% (по номинальному току) в течение двух минут без повреждения и остаточных деформаций.

§ 107. УХОД ЗА ГЕНЕРАТОРАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Успешная эксплуатация, а также срок службы генератора определяются в основном уходом за ним. За машинами постоянного тока требуется более тщательный уход, чем за машинами переменного тока.

Уход за генератором складывается из общего ухода, ухода за щетками, коллектором и подшипниками.

Правила общего ухода. 1. Удалять с генератора пыль и грязь сухой ветошью, а где это недоступно, продуть генератор ручным мехом (пыль и грязь могут привести к короткому замыканию, например, между оголенными концами проводников, которыми секции припаиваются к коллекторным пластинам).

2. Раз в месяц измерять сопротивление изоляции обмоток мегомметром и просушивать изоляцию, если ее сопротивление оказывается меньше 500 000 *ом* (сушить можно током, для чего обмотку возбуждения подключают к 4- или 5-вольтовой батарее, а якорь замыкают на амперметр и регулировочным реостатом устанавливают номинальный ток).

3. Перед пуском генератора проверять состояние щеткодержателей и положение траверсы по заводской метке.

Правила ухода за щетками и щеткодержателями. 1. Периодически удалять пыль и грязь между обоймой щеткодержателя и щеткой во избежание заклинивания щетки.

2. Не допускать давления щеток на коллектор выше установленной нормы (200—250 *г* на 1 *см*² рабочей поверхности щетки) и проверять давление пружинными весами (излишнее давление приводит к перегреву коллектора и щетки).

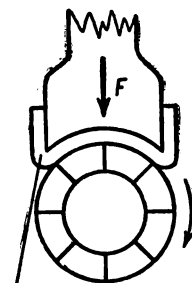
3. Негодную щетку заменить щеткой такой же марки.

Правила ухода за подшипниками. 1. Следить за износом шариковых подшипников и не допускать эксцентричного положения якоря (возможно повреждение якоря при задевании его за полюсы); изношенные подшипники заменять.

2. Периодически (один раз в 3—4 месяца) менять смазку в подшипниках (старую смазку предварительно удалять из подшипников и тщательно промывать их бензином).

Уход за коллектором. Следует различать чистку, полировку и обточку коллектора.

Чистить коллектор от угольной или графитной пыли нужно каждый раз после работы генератора под нагрузкой. Для чистки следует употреблять чистую ветошь, слегка смоченную керосином или бензином. При длительной безостановочной работе генератора коллектор можно чистить на ходу, но только сухой ветошью. Смазывать поверхность коллектора у находящегося в эксплуатации генератора какими-либо смазочными веществами не разрешается.



Стекло́нная бума́га

Рис. 259

К полировке коллектора прибегают в том случае, если в результате искрения щеток поверхность коллектора потускнела или покрылась пятнами, которые не устраняются обычной чисткой. Полируют коллектор при снятых щетках и пониженном числе оборотов генератора стеклянной бумагой, прикрепленной к вырезу специальной деревянной колодки (рис. 259). Вырез должен соответствовать диаметру коллектора. Полировку вначале производят крупной бумагой и заканчивают самой мелкой.

По окончании полировки поверхность коллектора следует очистить ветошью, чтобы не осталось медной пыли между коллекторными пластинами.

Обточка коллектора производится в случае неравномерного износа поверхности коллектора, ее эксцентricности, выступающей изоляции между пластинами, а также при глубоких выгораниях вследствие сильного и продолжительного искрения щеток. Работа эта производится на токарном станке. При обточке якорь должен быть вынут из машины. Частые обточки приводят к быстрому износу коллектора, поэтому к ним следует прибегать как можно реже.

Притирка щеток. Под притиркой щеток понимают подгонку их рабочей поверхности к коллектору. Притирают щетки при неподвижном якоре стеклянной бумагой, которую закладывают между щеткой и коллектором, а затем протягивают поочередно в обе стороны. Чтобы поверхность щетки получилась гладкой и без царапин, сначала применяют крупную, а в конце мелкую бумагу. После притирки коллектор тщательно очищают ветошью от щеточной и стеклянной пыли.

Притирке подвергаются как новые щетки, так и щетки с поврежденной рабочей поверхностью. В случае одновременной замены всех щеток генератору нужно дать поработать 2—3 часа вхолостую, чтобы новые щетки лучше притерлись на ходу.

§ 108. НЕИСПРАВНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ИХ ПРИЧИНЫ

Основные неисправности, вызываемые несоблюдением правил эксплуатации и ухода, сводятся к следующим: искрение щеток, перегрев коллектора и щеток, перегрев якорной обмотки и обмотки возбуждения, перегрев подшипников, невозбуждение генераторов.

Ниже приводятся причины, вызывающие указанные неисправности.

Искрение щеток. 1. Неправильное положение щеточной траверсы (в контурах секций, замкнутых щетками, возникают электродвижущие силы и токи вследствие пересечения магнитных силовых линий, а при разрыве контуров появляется искра).

2. Дрожание щеток вследствие ослабления крепления щеткодержателей (нарушается контакт между щетками и коллектором).

3. Выступающая выше поверхности коллектора изоляция пластин (нарушается контакт между щеткой и коллектором).

Перегрев коллектора и щеток. 1. Искрение щеток.

2. Чрезмерное давление щеток на коллектор.

Перегрев обмоток. 1. Короткое замыкание в обмотках (у закороченной части обмотки якоря может выгореть изоляция; по закороченной же части обмотки возбуждения ток не проходит, но зато остальная часть обмотки сильно перегревается от увеличения в ней тока из-за уменьшения сопротивления).

2. Перегрузка генератора (может быть из-за неправильных показаний амперметра).

Перегрев подшипников. 1. Недоброкачественная смазка.

2. Отсутствие смазки в подшипниках.

Невозбуждение генератора. 1. Несогласное включение шунтовой обмотки.

2. Отсутствие остаточного магнетизма в станине индуктора (полное размагничивание генератора может произойти иногда из-за короткого замыкания; для восстановления остаточного магнетизма достаточно на одно мгновение подать в обмотку возбуждения ток от постороннего источника постоянного тока, уменьшив при этом с помощью реостата ток в цепи перед ее разрывом, чтобы не вызвать появления значительной электродвижущей силы самоиндукции).

3. Обрыв в цепи обмотки возбуждения (в самой обмотке или в регулировочном реостате).

4. Слишком слабый нажим щеток на коллектор (отсутствие контакта между щеткой и коллектором).

5. Короткое замыкание в обмотке возбуждения (у самых выводов обмотки).

6. Обрыв в выводах якорной обмотки.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ VIII

1. Каковы главные части генератора постоянного тока и их назначение?
 2. Каково назначение коллектора в генераторе?
 3. Что называется электрической нейтралью в генераторе?
 4. Что называется параллельной ветвью в якорной обмотке и каковы свойства параллельных ветвей?
 5. Какие бывают якорные обмотки и какие требования предъявляются к ним?
 6. Что называется электродвижущей силой генератора и от чего зависит ее величина?
 7. Что следует понимать под реакцией якоря и каковы меры борьбы с искрением щеток, происходящим вследствие реакции якоря?
 8. Чем обусловлено появление тормозящего момента в генераторе?
 9. Что следует понимать под возбуждением генератора и какие бывают виды возбуждения?
 10. На чем основан принцип самовозбуждения генераторов?
 11. Каковы электрическая схема и свойства генератора с независимым возбуждением?
 12. Какие бывают генераторы с самовозбуждением?
 13. Каковы электрическая схема и свойства генератора с параллельным возбуждением?
 14. Каковы электрическая схема и свойства генератора со смешанным возбуждением и какую роль в нем выполняет последовательная обмотка?
 15. Как определяется согласное включение обмоток возбуждения у генератора со смешанным возбуждением?
 16. Чем отличаются магнитоэлектрические генераторы от обычных генераторов и каковы их свойства?
 17. Что называется коэффициентом усиления генератора?
 18. В чем конструктивное отличие электромашинного усилителя (амплидина) от обычного генератора?
 19. На чем основана работа электромашинного усилителя (объяснить, как осуществляется возбуждение усилителя)?
 20. Каково назначение компенсационной обмотки в электромашинном усилителе?
 21. В чем преимущество электромашинного усилителя перед обычным генератором?
 22. Какие различают потери (мощности) в электрических машинах?
 23. Что называется промышленным коэффициентом полезного действия генератора и какова его величина для различных генераторов?
 24. Чем определяется наибольшая допустимая температура нагрева генераторов?
 25. Как сказывается температура окружающего воздуха на полезной мощности генератора?
 26. Каковы правила ухода за щетками и коллектором генератора?
 27. Каковы причины искрения щеток и невозбуждения генераторов?
-

ГЛАВА IX

ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 109. ОБРАТИМОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ПРИНЦИП РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрические машины постоянного и переменного токов обладают свойством обратимости. Свойство это заключается в том, что каждая электрическая машина может работать генератором, превращая механическую энергию в электрическую, и двигателем, превращая электрическую энергию в механическую.

Обратимость явлений электромагнитной индукции и электромагнитного движения впервые была доказана русским академиком Э. Х. Ленцом в 1833 г. задолго до открытия этого свойства в электрических машинах.

В свойстве обратимости электрических машин можно легко убедиться из рис. 260, на котором изображен генератор постоянного тока. Если через обе обмотки генератора, т. е. через якорную и возбуждения, пропустить постоянный электрический ток от постороннего источника тока, то на активные проводники якорной обмотки начнут действовать силы F , которые и вызовут вращение якоря в направлении, указанном на рисунке (направления сил определяются по правилу левой руки).

Таким образом, силы, которые при работе машины генератором создавали тормозящий момент и препятствовали вращению якоря первичным двигателем, в этом случае используются в машине для ее работы в качестве электрического двигателя. Отсюда должно быть ясным, что принцип действия двигателя

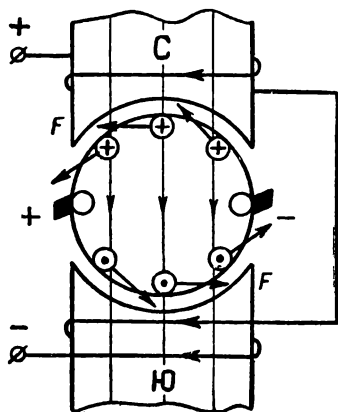


Рис. 260

постоянного тока основан на взаимодействии магнитного поля индуктора с током, проходящим по якорной обмотке ($F = BI$). По возбуждению двигателя, как и генераторы, бывают серийные, шунтовые и компаундные.

Первый электрический двигатель постоянного тока, имевший практическое значение, был изобретен русским ученым, академиком Б. С. Якоби в 1834 г. Однако широкого применения вследствие отсутствия рациональных источников постоянного тока двигатель Якоби в то время не получил.

Благодаря свойству обратимости электрических машин генератор и двигатель конструктивно один от другого ничем не отличаются. Как увидим дальше, электрические схемы двигателей также ничем не отличаются от схем генераторов.

Можно сказать, что все явления, которые мы наблюдали в генераторе, происходят и в двигателе, но играют в нем другую роль.

§ 110. ЯВЛЕНИЯ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ДВИГАТЕЛЕ

Реакция якоря

Реакция якоря в двигателе также сводится к искажению магнитного поля индуктора (рис. 261). В двигателе у набегающего края полюсов поле индуктора усилено, а у сбегающего ослаблено (у генераторов наоборот). Вследствие такого распределения магнитных силовых линий результирующего поля у двигателя электрическая нейтраль ab перемещается против направления вращения якоря. Меры борьбы с реакцией якоря у двигателя те же, что и у генератора: сдвиг щеток на электрическую нейтраль (при постоянной нагрузке) или введение добавочных полюсов.

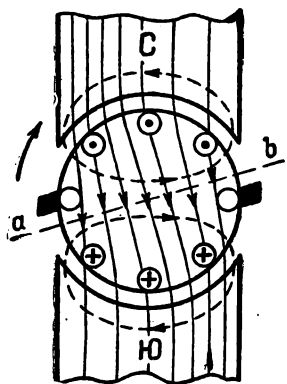


Рис. 261

Вращающий момент двигателя

Вращение якоря двигателя происходит благодаря силам взаимодействия тока якоря с полем индуктора (рис. 260), однако принято говорить, что якорь вращается под действием результирующего момента всех пар сил, приложенных к якорю. Этот результирующий момент называется вращающим моментом двигателя $M_{вр}$. По величине вращающий момент равен тормозящему моменту, который возникает в машине, когда она работает генератором. Поэтому величина вращающего момента определяется той же формулой $M_{вр} = c/\Phi$, которую мы вывели для тормозящего момента (§ 98).

Вращающий момент двигателя называется также полным вращающим моментом. Не более 5% момента двигатель расходует на преодоление собственных тормозящих усилий, возникающих под действием сил трения, остальную же, большую часть,— на преодоление тормозящего момента соединенной с ним рабочей машины (станка, вентилятора и т. п.). Эта большая часть полного момента двигателя называется его полезным моментом, развиваемым на валу.

Для двигателя постоянного тока, как и для любого механического двигателя, справедливо уравнение моментов

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{т}} \pm M_{\text{дин}}, \quad (126)$$

где $M_{\text{т}}$ — момент, создаваемый всеми тормозящими усилиями, как в самом двигателе, так и в рабочей машине за время работы двигателя;

$M_{\text{дин}}$ — динамический момент, возникающий в системе двигателя — рабочая машина вследствие инерции вращающихся частей системы при всяком изменении числа оборотов.

Общее выражение динамического момента следующее:

$$M_{\text{дин}} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t},$$

где J — момент инерции вращающегося тела;

$\frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ — его угловое ускорение.

При увеличении числа оборотов динамический момент прибавляется к тормозящему моменту, а при уменьшении вычитается, помогая двигателю вращать рабочую машину. При неизменном числе оборотов динамический момент не проявляется и уравнение моментов принимает вид

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{т}}. \quad (127)$$

Из уравнений (126) и (127) следует, что работа двигателя возможна лишь при условии, если его вращающий момент уравновешивает тормозящий и динамический моменты. Поэтому всякое изменение этих моментов вызывает соответствующее изменение вращающего момента, а следовательно, и потребляемого двигателем тока, с которым вращающий момент связан зависимостью

$$M_{\text{вр}} = cI\Phi.$$

Противоэлектродвижущая сила двигателя

При работе электрической машины в качестве двигателя якорная обмотка пересекает магнитные силовые линии индуктора и в ней возникает электродвижущая сила $E_{\text{д}} = cn\Phi$,

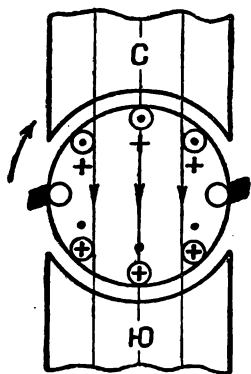


Рис. 262

как и при работе машины в качестве генератора. Как видно из рис. 262, направление этой электродвижущей силы противоположно направлению тока, поступающего в якорь, поэтому ее называют **противоэлектродвижущей силой** (на рисунке направление противоэлектродвижущей силы указано крестиками и точками рядом с активными проводниками якорной обмотки).

Для преодоления противоэлектродвижущей силы (фактически для преодоления сил магнитного поля) источник, посылающий ток в двигатель, должен расходовать на каждый единичный заряд дополнительную энергию, равную противоэлектродвижущей силе. Поэтому уравнение для двигательного режима машины следует написать так:

$$U = E_d + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (128)$$

где U — напряжение, подаваемое источником на зажимы двигателя;

E_d — противоэлектродвижущая сила;

$I_{\text{я}}$ — ток в якорной обмотке;

$R_{\text{я}}$ — сопротивление этой обмотки.

Энергия, расходуемая источником на преодоление противоэлектродвижущей силы, преобразуется в двигателе в механическую энергию (вращающийся якорь преодолевает тормозящие усилия в самом двигателе и приводит во вращение рабочую машину). Противоэлектродвижущая сила выполняет в двигателе роль автоматического регулятора тока, потребляемого двигателем при переменной нагрузке. Это подтверждается формулой

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_d}{R_{\text{я}}},$$

которая получается из уравнения двигательного режима.

Из формулы видно, что если напряжение, подаваемое источником на зажимы двигателя, и сопротивление якорной обмотки неизменны, то изменение тока, потребляемого двигателем, возможно лишь за счет изменения противоэлектродвижущей силы.

В действительности так и происходит. С увеличением тормозящего момента, например, число оборотов двигателя несколько уменьшается ($M_{\text{вр}} < M_{\text{т}}$), благодаря чему противоэлектродвижущая сила ($E_d = cn\Phi$) уменьшается, а величина тока возрастает. Возрастание же тока, потребляемого двигателем, увеличивает его вращающий момент ($M_{\text{вр}} = cI\Phi$).

В соответствии с новым тормозящим моментом ($M_{\text{вр}} = M_{\text{т}}$), и двигатель продолжает вращаться при несколько сниженном числе оборотов.

При уменьшении нагрузки получается обратная картина: число оборотов двигателя возрастает ($M_{\text{вр}} > M_{\text{т}}$), противо-электродвижущая сила увеличивается, а ток уменьшается.

Таким образом, благодаря явлению электромагнитной индукции двигатель постоянного тока не нуждается в специальном приборе, который бы регулировал потребляемый ток в соответствии с изменением нагрузки. Для удобства управления механическими двигателями необходимо иметь автоматический регулятор подачи горючей смеси или пара в их цилиндры.

Потребляемая и полезная мощности

Следует различать полезную мощность двигателя P (или мощность на валу) и потребляемую двигателем мощность

$$P_{\text{п}} = UI,$$

где U — напряжение на зажимах двигателя;

I — полный ток, потребляемый двигателем.

Полезная мощность меньше потребляемой на величину всех потерь в двигателе (т. е. потерь в меди, железе и механических потерь), поэтому ее величину можно выразить так:

$$P = P_{\text{п}} - \sum p.$$

Отношение полезной мощности к потребляемой дает промышленный к. п. д. двигателя:

$$\eta_{\%} = \frac{P}{P_{\text{п}}} \cdot 100 = \frac{UI - \sum p}{UI} \cdot 100. \quad (129)$$

Чем мощнее двигатель, тем выше его к. п. д. На практике для двигателей разной мощности к. п. д. лежит в пределах 67—92%.

Потери, возникающие в двигателе, вычислить трудно (за исключением потерь в меди), поэтому полезную мощность двигателя определяют опытным путем. Для этого с помощью тормозных приспособлений определяют вращающий момент, с которым полезная мощность связана зависимостью

$$P = \frac{nM_{\text{вр}}}{9560},$$

где n — число оборотов двигателя в минуту;

$M_{\text{вр}}$ — вращающий момент двигателя в ньютонметрах или в джоулях.

Для вывода формулы подсчитаем работу силы трения, которое возникает между шкивом и тормозным приспособлением (рис. 263). Воспользуемся формулой для вычисления работы $A = Fl$. В нашем случае $l = 2\pi rn$, поэтому работа силы трения

$$A = 2\pi rnF \text{ ньютонметрам,}$$

где r — радиус шкива в метрах;

n — число оборотов якоря в минуту;

F — сила трения в ньютонах.

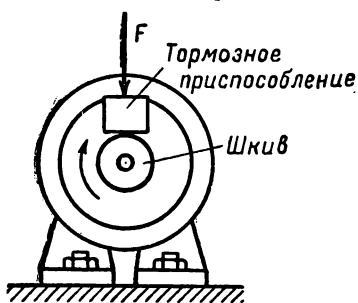


Рис. 263

Зная работу силы трения, находим полезную мощность двигателя по формуле

$$P = \frac{A}{60} = \frac{2\pi nrF}{60} \frac{\text{джоуль}}{\text{секунда}}.$$

Но $rF = M_{\text{вр}}$ — вращающий момент двигателя в ньютонметрах.

Тогда

$$P = \frac{2\pi n}{60} M_{\text{вр}} \text{ ватт.}$$

Разделив правую часть формулы на 1000, получим полезную мощность двигателя в киловаттах

$$P = \frac{2\pi n}{60 \cdot 1000} M_{\text{вр}} = \frac{nM_{\text{вр}}}{9560} \text{ киловатт.} \quad (130)$$

Если вращающий момент вычисляется в килограммометрах, то последняя формула принимает вид

$$P = \frac{nM_{\text{вр}}}{975} \text{ киловатт.} \quad (131)$$

§ 111. РЕГУЛИРОВКА ЧИСЛА ОБОРОТОВ ДВИГАТЕЛЕЙ

В двигателях постоянного тока возможна плавная регулировка числа оборотов, которая осуществляется двумя способами: изменением напряжения U и изменением магнитного потока Φ индуктора. Возможность регулировки оборотов указанными способами можно подтвердить математически, исходя из уравнения двигательного режима

$$U = E_d + I_a R_a.$$

Подставив в это уравнение $E_d = c n \Phi$, получим

$$U = c n \Phi + I_a R_a.$$

Отсюда число оборотов

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c \Phi}. \quad (132)$$

Из формулы видно, что число оборотов двигателя, действительно, зависит как от напряжения, так и от магнитного потока и может регулироваться в широких пределах.

Пределы, или диапазоны, регулировки принято определять отношением наибольшего числа оборотов к наименьшему, которые можно получить при работе двигателя. Для оценки пределов регулировки указывается обычно не отношение числа оборотов, а отношение кратных им чисел, например, 3 : 1; 10 : 1; 16 : 1.

Число оборотов, которое двигатель развивает при номинальных значениях напряжения и тока возбуждения, называется его **нормальным числом оборотов**. Это число оборотов указывается заводом в таблице паспортных данных двигателя.

Так как к двигателю нельзя подводить напряжение и ток возбуждения выше номинальных, то для понижения нормального числа оборотов необходимо уменьшать напряжение, подводимое к якору (согласно формуле для числа оборотов), а для повышения числа оборотов уменьшать ток возбуждения (для уменьшения магнитного потока).

Физические процессы, которые возникают в двигателе при изменении числа оборотов, заключаются в следующем.

С уменьшением напряжения, подводимого к якору, уменьшается и ток, поступающий в якорную обмотку ($I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{д}}}{R_{\text{я}}}$), а вместе с ним и вращающий момент $M_{\text{вр}} = cI\Phi$. В результате двигатель начинает уменьшать число оборотов ($M_{\text{вр}} < M_{\text{т}}$), но это приводит к уменьшению противоэлектродвижущей силы, благодаря чему ток, поступающий в якорную обмотку, увеличивается. Число оборотов двигателя уменьшается до тех пор, пока вследствие увеличения тока не восстанавливается равенство $M_{\text{вр}} = M_{\text{т}}$, при котором двигатель в дальнейшем вращается с неизменным числом оборотов.

Увеличение напряжения вызывает обратную картину. Из-за увеличения тока двигатель развивает больший вращающий момент ($M_{\text{вр}} > M_{\text{т}}$) и, следовательно, увеличивает число оборотов. Одновременно с этим возрастает и противоэлектродвижущая сила $E_{\text{д}} = cn\Phi$. Поэтому при некотором новом числе оборотов опять восстанавливается равенство $M_{\text{вр}} = M_{\text{т}}$.

Процессы, возникающие в двигателе при изменении числа оборотов вследствие изменения магнитного потока индуктора, можно объяснить аналогичными рассуждениями.

Так, с уменьшением магнитного потока Φ противоэлектродвижущая сила $E_{\text{д}} = cn\Phi$ уменьшается. При этом ток, потребляемый двигателем, увеличивается в большей степени, чем уменьшается магнитный поток, как следует из формулы $I_{\text{я}} = \frac{U - cn\Phi}{R_{\text{я}}}$. В результате вращающий момент $M_{\text{вр}} = cI_{\text{я}}\Phi$ увеличивается ($M_{\text{вр}} > M_{\text{т}}$) и двигатель начинает вращаться

быстрее до тех пор, пока не восстановится равенство $M_{\text{вр}} = M_{\text{т}}$ вследствие увеличения противоэлектродвижущей силы, которая уменьшает ток, потребляемый двигателем.

Увеличение магнитного потока приводит к уменьшению вращающего момента (поскольку ток, потребляемый двигателем, уменьшается в большей степени, чем увеличивается магнитный поток), вследствие чего число оборотов двигателя уменьшается до восстановления равенства $M_{\text{вр}} = M_{\text{т}}$ (из-за увеличения тока при уменьшении противоэлектродвижущей силы).

§ 112. ПУСК ДВИГАТЕЛЕЙ И ИХ РЕВЕРСИРОВАНИЕ

Если двигатель постоянного тока (например, шунтовой) подключить к питающему источнику по схеме генератора (рис. 264), то в момент включения рубильника в двигатель пойдет очень большой ток, опасный для его целости. По мере

разворота якоря ток будет уменьшаться и при полном числе оборотов достигнет значения, соответствующего тормозящему моменту, приложенному к двигателю.

Для объяснения этого явления обратимся к формуле $I = \frac{U - E_{\text{д}}}{R_{\text{я}}}$, определяющей величину тока, потребляемого двигателем.

В момент пуска двигателя его якорь неподвижен ($n = 0$), поэтому противоэлектродвижущая сила $E_{\text{д}} = c n \Phi$ в якорной обмотке равна нулю, какое бы значение ни имел магнитный поток индуктора. При отсутствии противоэлектродви-

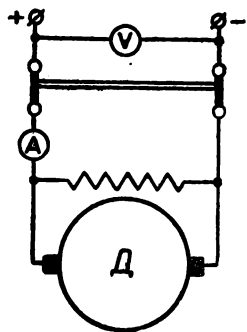


Рис. 264

жущей силы ток в двигателе определяется выражением

$I = \frac{U}{R_{\text{я}}}$ и поэтому может быть очень большим, так как сопротивление якорной обмотки $R_{\text{я}}$ в машинах незначительно.

Пусть номинальные данные двигателя следующие: $U_{\text{н}} = 100$ в; $I_{\text{н}} = 10$ а; $R_{\text{я}} = 0,1$ ом. Тогда пусковой ток

$$I_{\text{п}} = \frac{100}{0,1} = 1000 \text{ а},$$

т. е. в сто раз больше номинального. Такой большой пусковой ток в двигателе недопустим по ряду причин: он может вызвать сильный перегрев якорной обмотки, привести к искрению щеток, так как поле якоря вследствие магнитного насыщения добавочных полюсов не будет скомпенсировано полностью, и, наконец, может вызвать механические повреждения

(например, поломку вала из-за резкого поворота якоря под действием сильного вращающего момента).

Для устранения этих нежелательных последствий пусковой ток в двигателях уменьшают, включая последовательно с якорной обмоткой пусковой реостат. Реостаты чаще всего изготовляют рычажного типа (рис. 245, б), причем для улучшения охлаждения их помещают в металлический бак, наполненный трансформаторным маслом. Так как время пуска двигателей обычно незначительно (2—3 сек. для двигателей средней мощности), то для увеличения пускового вращающего момента (что необходимо для преодоления динамического момента) в якорную обмотку за все время пуска дают полуторный номинальный ток ($I_n = 1,5I_n$). При таком токе за короткое время, необходимое для пуска, двигатель не успевает перегреться.

Сопротивление R_n пускового реостата двигателей можно определить по формуле $1,5I_n = \frac{U_n}{R_n + R_{\text{я}}}$. Если пренебречь в этой формуле сопротивлением якорной обмотки $R_{\text{я}}$, то получим

$$R_n = \frac{U_n}{1,5I_n}. \quad (133)$$

Одновременно с разворотом якоря в его обмотке начинает индуцироваться противоэлектродвижущая сила, которая уменьшает пусковой ток. Поэтому по мере нарастания противоэлектродвижущей силы необходимо выводить сопротивление пускового реостата с таким расчетом, чтобы ток в якорной обмотке не превосходил полуторного значения номинального тока.

Когда якорь развернется до полного числа оборотов, пусковой реостат полностью выводится, так как в дальнейшем регулировку тока в двигателе осуществляет противоэлектродвижущая сила. Пусковой реостат нужно выводить медленно (следа за показаниями амперметра), иначе в якорь будет поступать ток больше $1,5I_n$.

Двигатели небольшой мощности (до 1 кВт) можно пускать без пускового реостата, потому что у них якорные обмотки имеют сравнительно большое сопротивление.

Реверсирование двигателей осуществляется изменением направления тока либо в обмотке якоря, либо в обмотке возбуждения. Одновременное изменение направления тока в якоре и в обмотке возбуждения реверса не дает, поэтому если поменять местами («перекрестить») провода на питающем рубильнике (рис. 265, а), то двигатель будет вращаться в прежнем направлении. Реверсирование двигателей указанными способами поясняется рис. 265, б.

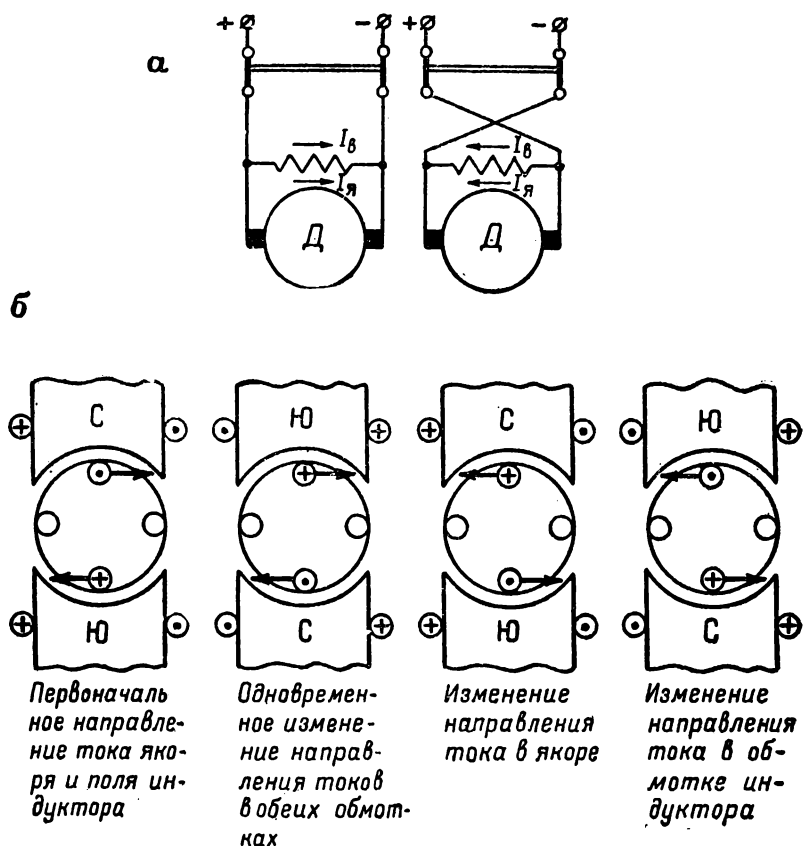


Рис. 265

§ 113. ДВИГАТЕЛЬ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Двигатель с параллельным возбуждением (шунтовой двигатель) имеет обмотку возбуждения, подключенную параллельно к якору (обе обмотки нужно рассматривать как два соединенных параллельно приемника). Электрическая схема двигателя с пусковым R_n и регулировочным R_p реостатами изображена на рис. 266.

В качестве регулировочного реостата используется обычный ползунковый реостат. У пускового реостата, в отличие от рычажного (рис. 245, б), имеется еще дугообразная пластина, к выводу которой подсоединяется одним концом цепь обмотки возбуждения. Пластина соприкасается с рычагом, пока он скользит по рабочим контактам, и таким образом обеспе-

чивает питание обмотки возбуждения. При постановке рычага реостата на холостой контакт его касание с пластиной нарушается и шунтовая обмотка отсоединяется от источника тока. Для устранения разрыва цепи параллельной обмотки при остановке двигателя (когда рычаг реостата ставится на холостой контакт) пластину соединяют с левым рабочим контактом реостата перемычкой.

Перед пуском двигателя рычаг пускового реостата обязательно устанавливается на холостой контакт. Такое положение рычага дает возможность пускать двигатель при включенном рубильнике и при полностью введенном сопротивлении реостата.

Регулировочный реостат R_p перед пуском полностью выводится, чтобы обеспечить номинальное напряжение параллельной обмотки для создания в индукторе полного магнитного потока, необходимого как для увеличения пускового вращающего момента двигателя, так и для быстрого нарастания в якорной обмотке противоэлектродвижущей силы.

Для пуска двигателя сначала включают рубильник, а затем медленно выводят сопротивление пускового реостата и следят за показаниями амперметра. При остановке двигателя быстро возвращают рычаг пускового реостата на холостой контакт, а затем выключают рубильник, чтобы повторный пуск не произвести при выведенном сопротивлении пускового реостата.

Увеличение числа оборотов двигателя по сравнению с нормальным осуществляют с помощью регулировочного реостата в цепи параллельной обмотки. К регулировке числа оборотов изменением напряжения (для понижения числа оборотов) прибегают редко, при крайней необходимости, чтобы избежать больших потерь энергии в реостате за счет тока, потребляемого якорем.

Для реверсирования двигателя с параллельным возбуждением, если оно по условиям работы предельвается часто и на ходу, изменяют направление тока в обмотке якоря, чтобы не разрывать цепь обмотки возбуждения (электродвижущая сила самоиндукции в якорной обмотке незначительна, кроме того, нарастание тока в параллельной обмотке после ее переключения происходит сравнительно медленно из-за большой постоянной времени). Реверсировать на ходу можно не всякий двигатель, а только рассчитанный на такой режим, так как при этом якорь останавливается и противоэлектродвижущая сила доходит до нуля, поэтому броски тока в якорную

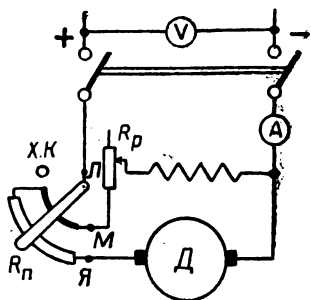


Рис. 266

обмотку достигают больших значений и могут вызвать ее перегрев, а также привести к механическим повреждениям.

Реверсирование двигателя осуществляется с помощью переключателя Π , включаемого в цепь якорной обмотки (рис. 267). Если же реверсирование производится не на ходу, то безразлично, в какой обмотке изменять направление тока. В этом случае двигатель нужно остановить, переключить концы одной из обмоток и затем пустить вновь.

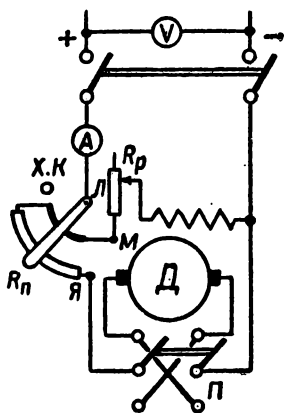


Рис. 267

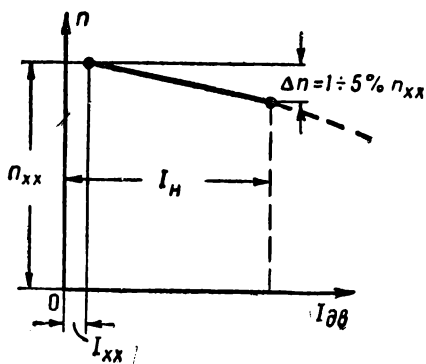


Рис. 268

Зависимость числа оборотов двигателя, а также его вращающего момента от потребляемого тока удобно рассмотреть на соответствующих характеристиках. На рис. 268 изображена так называемая скоростная характеристика двигателя с параллельным возбуждением. Для объяснения характеристики обратимся к формуле

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c\Phi}.$$

У работающего двигателя напряжение на зажимах якоря и магнитный поток можно считать постоянными. С увеличением нагрузки возрастает ток, потребляемый двигателем. Однако от этого незначительно изменяется лишь внутреннее падение напряжения в обмотке якоря $I_a R_a$ и тем меньше, чем мощнее двигатель (меньше сопротивление R_a). Поэтому и число оборотов у двигателей с параллельным возбуждением изменяется незначительно, от 1 до 5% числа оборотов холостого хода $n_{xх}$. Это свойство двигателя с параллельным возбуждением дает возможность применять его в тех случаях, когда требуется сравнительное постоянство числа оборотов при переменной нагрузке (для токарных и сверлильных станков, например).

Зависимость вращающего момента двигателя от потреб-

ляемого им тока, графически изображенная на рис. 269, имеет вид прямой линии. Такой характер зависимости вытекает из выражения

$$M_{вр} = cI\Phi.$$

Так как у двигателя с параллельным возбуждением магнитный поток Φ остается постоянным при неизменном токе возбуждения, то вращающий момент этого двигателя

$$M_{вр} = c_1 I,$$

где $c_1 = c\Phi$ — постоянная величина, характеризующая прямо пропорциональную зависимость, которая графически изображается в виде прямой линии.

Следует отметить одно отрицательное свойство двигателя с параллельным возбуждением. Оно заключается в том, что в случае обрыва в цепи параллельной обмотки двигатель при малом тормозящем моменте (обычно на холостом ходу) идет вразнос, т. е. начинает развивать очень большое число оборотов, опасное для его целостности. Одновременно с этим возрастает и ток, потребляемый двигателем. Происходит это потому, что при обрыве в параллельной обмотке резко уменьшается противоэлектродвижущая сила (в индукторе остается лишь незначительный поток остаточного магнетизма), отчего в обмотку якоря устремляется большой ток, вызывающий увеличение вращающего момента ($M_{вр} = cI\Phi$).

Превышение вращающего момента над тормозящим и приводит к увеличению числа оборотов двигателя при обрыве обмотки возбуждения, причем число оборотов увеличивается до тех пор, пока противоэлектродвижущая сила в ослабленном магнитном поле не достигнет величины, восстанавливающей равенство

$$M_{вр} = M_{т}.$$

Если обрыв в параллельной обмотке происходит при значительном тормозящем моменте, то двигатель останавливается, потребляя при этом большой ток, как и в момент пуска без пускового реостата (по существу потребляет ток короткого замыкания $I_{кз} = \frac{U}{R_{я}}$). Остановка двигателя объясняется тем, что для сохранения величины вращающего момента ток в якоре двигателя должен стать больше тока короткого замыкания, что, конечно, невозможно.

При всех случаях обрыва в цепи параллельной обмотки двигатель необходимо как можно скорее остановить, чтобы предупредить возможные повреждения.

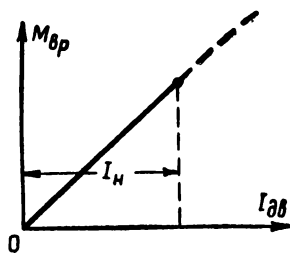


Рис. 269

§ 114. ДВИГАТЕЛЬ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Электрическая схема двигателя с последовательным возбуждением изображена на рис. 270. Обмотка возбуждения включается последовательно с якорной обмоткой. Пусковой реостат R_n имеет только два зажима: $Л$ — линия и $Я$ — якорь.

Для регулировки числа оборотов параллельно с последовательной обмоткой включен регулировочный реостат R_p . Уменьшение магнитного потока достигается ответвлением тока последовательной обмотки через регулировочный реостат при уменьшении его сопротивления.

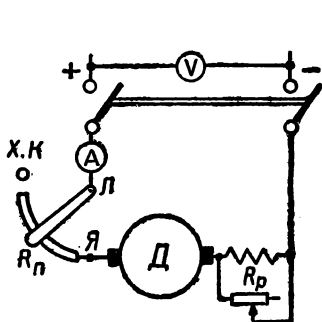


Рис. 270

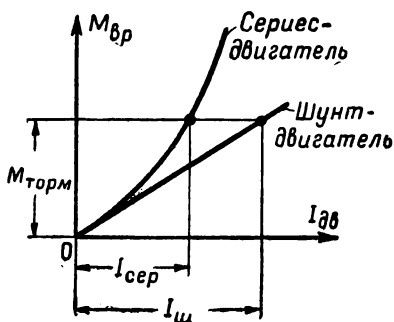


Рис. 271

Пуск двигателя осуществляется медленным уменьшением сопротивления пускового реостата после включения рубильника. Для остановки двигателя сначала нужно поставить рычаг реостата на холостой контакт, а затем выключить рубильник. При остановке двигателя цепь якорной и последовательной обмоток можно разрывать, так как электродвижущая сила самоиндукции, возникающая в обмотках, незначительна.

Число оборотов двигателя с последовательным возбуждением регулируют либо с помощью регулировочного реостата в цепи якоря (изменением напряжения), и тогда он ставится вместо пускового, либо с помощью регулировочного реостата R_p в цепи возбуждения. При втором способе теряется меньше энергии, так как по реостату проходит неполный ток якоря.

Для реверсирования двигателя совершенно безразлично, где изменять направление тока — в якорной или последовательной обмотке.

Характеристика вращающего момента двигателя с последовательным возбуждением, изображенная на рис. 271, и соответствует квадратичной зависимости $M_{вp} = c_2 I_{дв}^2$. Такая зависимость объясняется тем, что у этого двигателя магнитный поток, создаваемый последовательной обмоткой, можно счи-

тать пропорциональным току, потребляемому двигателем: $\Phi = c_1 I_{\text{дв}}$ (если не учитывать магнитного насыщения индуктора при больших токах). Поэтому общее выражение вращающего момента $M_{\text{вр}} = c I \Phi$ для двигателя с последовательным возбуждением принимает вид

$$M_{\text{вр}} = c c_1 I_{\text{дв}} I_{\text{дв}},$$

или

$$M_{\text{вр}} = c_2 I_{\text{дв}}^2,$$

где $c_2 = c c_1$ — некоторый постоянный коэффициент.

Сравнивая кривые вращающих моментов двигателей с параллельным и последовательным возбуждением (рис. 271), видим, что для преодоления одного и того же тормозящего момента двигатель с последовательным возбуждением потребляет гораздо меньший ток, чем двигатель с параллельным возбуждением (при одинаковой мощности).

Благодаря этому двигатель с последовательным возбуждением применяется там, где требуются большие вращающие моменты (на подъемных кранах, для вентиляторов). Особенно широко он применяется как тяговый в трамваях, троллейбусах, электровозах и в качестве стартерного на автомобилях.

По скоростной характеристике (рис. 272) двигатель с последовательным возбуждением также резко отличается от двигателя с параллельным возбуждением. Он сильно изменяет число оборотов с изменением нагрузки, а на холостом ходу идет вразнос (как и двигатель с параллельным возбуждением при обрыве обмотки возбуждения). Поэтому двигатель с последовательным возбуждением нельзя пускать без нагрузки, а также соединять с рабочей машиной ременной передачей.

Скоростную характеристику двигателя с последовательным возбуждением можно объяснить формулой

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c \Phi}.$$

Действительно, на холостом ходу двигатель развивает незначительный вращающий момент (не более 5% от $M_{\text{вр}}$), поэтому ток и магнитный поток двигателя также незначительны. Если пренебречь внутренним падением напряжения $I_a R_a$ в якорной обмотке, то, как следует из формулы, слабый магнитный поток будет увеличивать число оборотов (при пуске

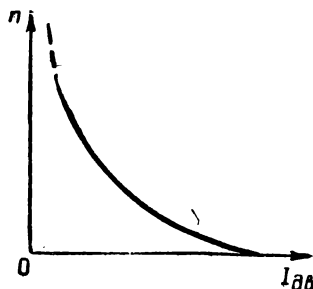


Рис. 272

двигателя в якорную обмотку поступает ток значительно больше необходимого для создания вращающего момента, равного по величине тормозящему моменту холостого хода, поэтому число оборотов двигателя на холостом ходу увеличивается до тех пор, пока не восстановится равенство $M_{\text{вр}} = M_{\text{т}}$ при соответствующем значении противоэлектродвижущей силы). По мере увеличения нагрузки растут ток и магнитный поток, но и то и другое вызывает уменьшение числа оборотов.

§ 115. ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

Торможение двигателей постоянного тока осуществляется электрическим путем. Оно заключается в том, что изменяется направление вращающего момента, в результате чего двигатель резко замедляет скорость вращения и останавливается. Из трех существующих способов торможения мы рассмотрим только два — динамическое торможение и торможение обратным током.

Динамическое торможение основано на свойстве обратимости электрических машин. Благодаря этому свойству любой двигатель постоянного тока, будучи отключен от питающего его источника, сразу же переходит в генераторный режим (вращаясь по инерции) из-за наличия в нем противоэлектродвижущей силы. Следовательно, если одновременно с отключением от источника двигатель замкнуть на небольшое сопротивление, то под действием противоэлектродвижущей силы в замкнутой цепи якорной обмотки возникнет большой ток, который и создаст в двигателе тормозящий момент, т. е. момент, направленный против его вращения. Под действием этого момента двигатель быстро остановится. Так как при отключении от источника тока вращение двигателя поддерживается динамическим моментом (по инерции), то и само торможение называется динамическим.

Для более эффективного торможения у шунтового двигателя с параллельным возбуждением параллельная обмотка не должна отсоединяться от источника тока, а у двигателя с последовательным возбуждением одновременно с отсоединением его от источника необходимо переключить концы последовательной обмотки с помощью переключателя, чтобы не допустить размагничивания полюсов под действием обратного тока.

Торможение обратным током заключается в том, что у двигателя изменяется направление тока в якорной обмотке, т. е. происходит то же самое, что и при реверсировании на ходу по обычной схеме (рис. 267). При торможении обратным током в схеме двигателя должно быть специальное реле для отключения двигателя от сети в момент его остановки, иначе он пойдет сразу же в обратную сторону.

§ 116. ДВИГАТЕЛЬ С НЕЗАВИСИМЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Электрические схемы рассмотренных нами двигателей хотя и дают возможность регулировки оборотов в широких пределах (до 16:1), однако обладают существенными недостатками, которые ограничивают область их применения.

Основной недостаток схем заключается в том, что в них возникают значительные потери энергии в реостатах, которые включаются последовательно с якорной обмоткой для регулировки числа оборотов двигателя способом изменения подводимого к нему напряжения. Отказ от этого способа приводит к резкому сокращению пределов регулировки, так как одним лишь изменением магнитного потока пределы не превышают 3:1 (верхний предел ограничивается механической прочностью якоря, а также искрением щеток вследствие магнитного насыщения добавочных полюсов при больших токах, потребляемых двигателем).

Не менее существенным недостатком схем является и то, что при регулировке числа оборотов изменением напряжения невозможно достигнуть постоянства числа оборотов при переменной нагрузке даже у двигателей с параллельным возбуждением. Объясняется это тем, что при всяком изменении нагрузки изменяется ток, потребляемый двигателем, а следовательно, и падение напряжения в регулировочном реостате ($U_p = IR_p$) (рис. 273), что в свою очередь ведет к изменению напряжения на зажимах якоря ($U_y = U_{ист} - U_p$) и к изменению числа его оборотов

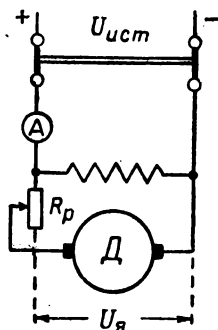


Рис. 273

$$\left(n = \frac{U_y - I_y R_y}{c\Phi} \right).$$

Для уменьшения потерь и сохранения максимальных пределов регулировки числа оборотов на практике очень часто прибегают к раздельному питанию обмоток двигателя с параллельным возбуждением, который в основном и используется в качестве привода для вращения всевозможных станков, машин и отдельных механизмов у различных приборов. При таком питании обмоток двигатель постоянного тока называется двигателем с независимым возбуждением.

Электрическая схема двигателя изображена на рис. 274. В этой схеме генератор G , питающий якорную обмотку двигателя D , и возбудитель B укреплены на одном валу с вращающим их двигателем трехфазного тока. Возбудитель представляет собой небольшой генератор с параллельным возбуждением, от которого питаются обмотки возбуждения гене-

ратора и двигателя. Такое питание двигателя требует больших первоначальных затрат. Эти затраты вполне оправдывают себя при эксплуатации установки благодаря незначительным потерям в ней на регулировку числа оборотов и управление двигателем.

Незначительные потери — не единственное преимущество данной схемы перед обычными схемами. Рассматриваемая схема позволяет производить безреостатный пуск двигателя (пуск без потерь) и значительно улучшает условия реверсирования и торможения двигателя (без разрыва цепи якорной обмотки). Работа отдельных элементов схемы сводится к следующему.

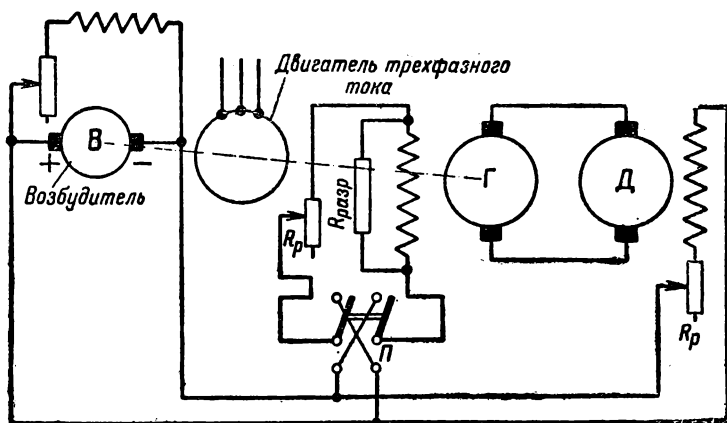


Рис. 274

После пуска двигателя трехфазного тока у возбудителя устанавливается номинальное напряжение, под действием которого в параллельную обмотку двигателя поступает также номинальный ток; необходимый для создания полного магнитного потока в индукторе (регулирующий реостат в цепи параллельной обмотки двигателя должен быть полностью выведен). В дальнейшем за все время работы напряжение на зажимах возбудителя не изменяется.

Для пуска двигателя достаточно включить переключатель Π обмотки возбуждения генератора и начать постепенно увеличивать в ней ток (уменьшением сопротивления регулирующего реостата). При самом незначительном напряжении на зажимах генератора двигатель начинает медленно вращаться даже при полной нагрузке благодаря сильному магнитному потоку в индукторе и номинальному току в якоре.

Каждому положению ползунка регулирующего реостата генератора соответствует определенное, почти не изменяющееся число оборотов двигателя при переменной нагрузке.

При полностью выведенном реостате двигатель развивает нормальное число оборотов. Для дальнейшего повышения числа оборотов уменьшается ток в обмотке возбуждения двигателя. Регулировка оборотов осуществляется в пределах 16:1—20:1.

Для динамического торможения двигателя выключают переключатель в цепи обмотки возбуждения генератора. При этом напряжение на зажимах генератора падает до нуля, а двигатель переходит в генераторный режим и быстро останавливается. Чтобы избежать разрыва цепи обмотки возбуждения генератора, параллельно с обмоткой включается разрядное сопротивление $R_{\text{разр}}$.

Реверсирование двигателя осуществляется изменением полярности зажимов генератора, для чего изменяется направление тока в его обмотке возбуждения с помощью переключателя П.

Рассмотренная схема удобна для управления двигателем и вместе с тем значительно снижает потери в реостатах. Для дальнейшего уменьшения потерь энергии на управление двигателем в данную схему вместо генератора включают электромашинный усилитель (амплидин).

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ IX

1. В чем заключается принцип обратимости электрических машин?
 2. На чем основан принцип работы двигателя постоянного тока?
 3. К чему сводится реакция якоря в двигателе и каковы меры борьбы с ней?
 4. Что называется вращающим моментом двигателя и от чего зависит его величина?
 5. Что называется противоэлектродвижущей силой в двигателе и какова ее роль?
 6. Что называется полезной, а также потребляемой мощностью двигателя?
 7. Как осуществляется регулировка оборотов у двигателей?
 8. Для чего служит пусковой реостат при пуске двигателя?
 9. Как осуществляется реверсирование двигателей?
 10. Каковы электрическая схема и свойства двигателя с параллельным возбуждением?
 11. Каковы электрическая схема и свойства двигателя с последовательным возбуждением?
 12. Каковы способы электрического торможения двигателей и в чем заключается принцип торможения?
 13. Какова электрическая схема двигателя с независимым возбуждением и в чем ее преимущества перед схемой обычного питания двигателей?
-

ГЛАВА X

ТРАНСФОРМАТОРЫ

§ 117. НАЗНАЧЕНИЕ И УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Трансформатором называется электромагнитный аппарат, который служит для преобразования действующего значения переменного напряжения без изменения его частоты. Принцип действия трансформатора основан на явлении электромагнитной индукции, причем в трансформаторе, как и в индукционной катушке, преобразование напряжения осуществляется способом взаимоиндукции.

Приоритет в изобретении трансформатора принадлежит выдающемуся русскому ученому П. Н. Яблочкову. В 1876 году П. Н. Яблочков впервые применил трансформатор (названный индукционной катушкой) для питания переменным током изобретенных им электрических свечей. Спустя шесть лет, в 1882 году, на Московской промышленной выставке трансформатор несколько измененной конструкции демонстрировался другим русским электротехником — И. Ф. Усагиным.

Изобретением трансформатора было положено начало широкому применению электрической энергии для разнообразных практических целей. В настоящее время трансформатор является одним из основных элементов, обеспечивающих передачу электрической энергии на большие расстояния и распределение ее среди потребителей.

Кроме этого основного своего назначения, трансформатор находит большое применение также в промышленности и в технике. О многообразии технических задач, решаемых трансформатором, свидетельствует хотя бы тот факт, что современные трансформаторы выполняются мощностью от нескольких ватт до десятков тысяч киловатт.

По числу фаз, преобразующих напряжение, трансформаторы бывают однофазные и трехфазные. Как те, так и другие в зависимости от мощности выполняются либо с воздуш-

ным (до 10 квт), либо с масляным (свыше 10 квт) охлаждением.

Мы рассмотрим трансформаторы малой мощности как наиболее распространенные на практике и особенно в технике слабых токов. Начнем с однофазного трансформатора. Он состоит из сердечника и двух обмоток. Обмотки изготавливаются

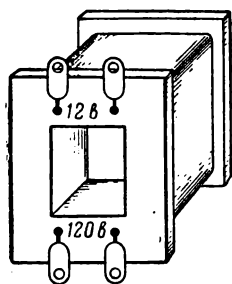


Рис. 275

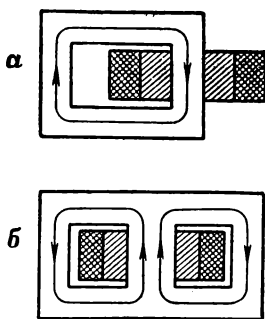


Рис. 276

из медной изолированной проволоки разного сечения и с разным количеством витков. Обмотка, у которой больше витков и меньше сечение проволоки, является обмоткой высокого напряжения, другая — обмоткой низкого напряжения.

Для удобства выполнения и лучшей изоляции от сердечника обе обмотки наматываются на картонное основание в виде катушки (рис. 275). Первой наматывается обмотка низкого напряжения, а на нее после надежного слоя изоляции — обмотка высокого напряжения. Концы обмоток обычно выводятся через одно из оснований катушки и припаиваются оловом к укрепленным на нем наконечникам. Между наконечниками указываются номинальные напряжения обмоток. Сердечник для уменьшения в нем вихревых токов набирается из отдельных штампованных листов специальной трансформаторной стали.

Сердечники бывают стержневые (рис. 276, а) и броневые (рис. 276, б). В обоих случаях катушка с обмотками располагается на одном из стержней сердечника, как показано на рис. 276. Броневые сердечники дают меньший магнитный поток рассеяния, но стоимость их выше, чем стержневых. Полностью собранный сердечник стягивается с двух сторон бо-

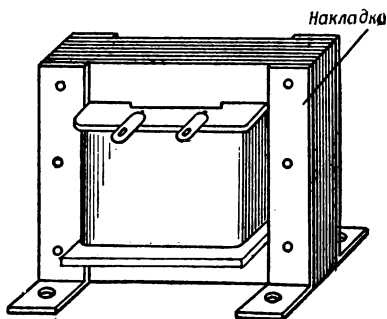


Рис. 277

ковыми накладками с помощью болтов (рис. 277). Нижние концы накладок отгибаются и используются для крепления трансформатора по месту монтажа.

Каждый трансформатор может работать как повышающий и как понижающий в зависимости от того, к какой из его обмоток будет подведено номинальное напряжение для преобразования. Обмотка, к которой при работе трансформатора подводится напряжение от источника тока, называется первичной (независимо от того, будет ли это обмотка высокого или низкого напряжения). Обмотка же, с которой снимается преобразованное напряжение, называется вторичной.

На практике очень часто применяются многообмоточные трансформаторы, у которых имеется несколько первичных и вторичных обмоток с разным количеством витков для получения нужных напряжений. У таких трансформаторов должно быть и соответствующее число наконечников с выводами обмоток.

Мощные высоковольтные трансформаторы конструктивно отличаются от маломощных главным образом тем, что помещаются в металлический бак, наполненный трансформаторным маслом (для улучшения охлаждения), а концы их обмоток выводятся на крышку бака через фарфоровые изоляторы.

Для преобразования напряжений с частотой выше 10 000 гц трансформаторы со стальными сердечниками непригодны из-за сильного нагревания сердечников вследствие большой потери энергии в них (на перемагничивание и от вихревых токов). Для уменьшения потерь высокочастотные трансформаторы выполняются либо совершенно без сердечников, либо с сердечниками из магнитодиэлектриков (магнетита, прессперма, альсифера и др.).

§ 118. РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА ТРАНСФОРМАТОРА

Режимом холостого хода трансформатора называется такой режим, при котором первичная обмотка трансформатора питается от источника переменного тока благодаря подведенному к ней напряжению U_1 , а вторичная обмотка разомкнута. Электрическая схема трансформатора в режиме холостого хода изображена на рис. 278.

В режиме холостого хода трансформатор ничем не отличается от катушки с железным сердечником (§ 71). Поэтому можно считать, что ток I_0 , проходя по первичной обмотке, создает в сердечнике синусоидально изменяющийся магнитный поток Φ_0 , который из-за явления гистерезиса отстает от тока на небольшой угол потерь δ (порядка 5—6°), как это показано на векторной диаграмме (рис. 279). Ток, потребляемый первичной обмоткой, называется **током холостого хода транс-**

форматора, а магнитный поток в сердечнике — рабочим магнитным потоком.

При своем изменении в сердечнике магнитный поток пересекает обе обмотки трансформатора и наводит в них электродвижущие силы: в первичной обмотке — электродвижущую силу самоиндукции E_1 , а во вторичной — электродвижущую силу взаимоиндукции E_2 . Эти электродвижущие силы отстают

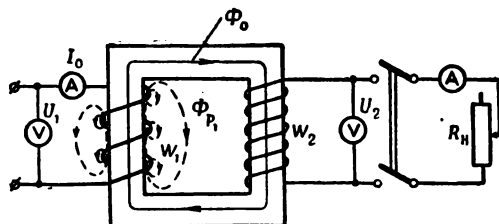


Рис. 278

от потока на 90° (рис. 279). Действующие значения электродвижущих сил вследствие синусоидального изменения магнитного потока, сцепленного с витками обмоток (§ 71), можно определить по формулам

$$E_1 = 4,44fW_1\Phi_{0m} \quad (134)$$

и

$$E_2 = 4,44fW_2\Phi_{0m}, \quad (135)$$

где W_1 и W_2 — количество витков в обмотках;

f — частота тока в первичной обмотке;

Φ_{0m} — максимальное значение магнитного потока в сердечнике.

Разделив выражение (134) на (135), получим

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (136)$$

Это соотношение выражает собой основное свойство трансформатора, заключающееся в том, что электродвижущие силы в его обмотках пропорциональны количеству витков. Отношение витков $\frac{W_1}{W_2} = K$ называется **коэффициентом трансформации**.

Мы учли действие рабочего, или главного, магнитного потока. Наряду с этим потоком в трансформаторе имеется еще магнитный поток рассеяния Φ_{p1} , который сцеплен только с витками первичной обмотки и замыкается по воздуху (в непосредственной близости от витков). Поток рассеяния совпадает по фазе с током холостого хода (так как в воздухе магнитный поток всегда пропорционален току) и создает в первичной обмотке электродвижущую силу самоиндукции E_{p1} , отстающую от него на 90° (рис. 279),

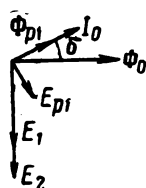


Рис. 279

Таким образом, в первичной обмотке трансформатора создаются две электродвижущие силы самоиндукции: одна E_1 — рабочим магнитным потоком, другая E_{p1} — магнитным потоком рассеяния. Для поддержания в обмотке тока холостого хода подводимое к ней напряжение U_1 должно расходоваться как на создание этих электродвижущих сил, так и на преодоление активного сопротивления обмотки R_1 в виде активного падения напряжения $U_R = I_0 R_1$. Такая зависимость между напряжением U_1 , подводимым к обмотке, и возникающими в ней электродвижущими силами, а также активным падением напряжения может быть выражена в векторной форме в виде равенства

$$\overline{U}_1 = (-\overline{E}_1) + (-\overline{E}_{p1}) + \overline{I}_0 \overline{R}_1.$$

Расход части напряжения U_1 на создание электродвижущей силы самоиндукции потоком рассеяния можно учесть, как и в обычной цепи без железного сердечника, индуктивным падением напряжения

$$U_L = I_0 X_{L1} = -E_{p1},$$

где $X_{L1} = \omega L_1$ — индуктивное сопротивление обмотки.

Тогда написанное нами равенство примет вид

$$\overline{U}_1 = (-\overline{E}_1) + \overline{I}_0 \overline{R}_1 + \overline{I}_0 \overline{X}_{L1}. \quad (137)$$

Пользуясь этим равенством, можно построить полную векторную диаграмму холостого хода трансформатора (рис. 280), зная, что активное падение напряжения совпадает по фазе с током, а индуктивное опережает его на 90° . Диаграмму строят в следующем порядке.

После изображения векторов \overline{I}_0 , $\overline{\Phi}_0$, $\overline{\Phi}_{p1}$, \overline{E}_1 и \overline{E}_{p1} на диаграмму наносят вектор $-\overline{E}_1$, уравнивающий собой вектор электродвижущей силы самоиндукции \overline{E}_1 . Вектор $-\overline{E}_1$ изображает собой часть напряжения U_1 , которое расходуется на создание электродвижущей силы E_1 .

Затем геометрически складывают вектор $-\overline{E}_1$ с векторами активного $\overline{I}_0 \overline{R}_1$ и индуктивного $\overline{I}_0 \overline{X}_{L1}$ падений напряжения в обмотке. Для этого от конца вектора $-\overline{E}_1$ прово-

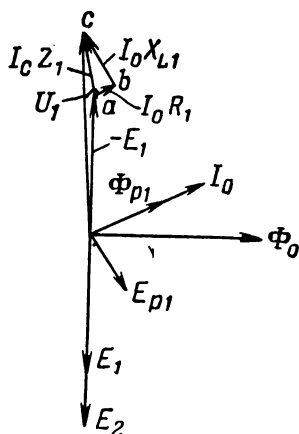


Рис. 280

дят вектор $\overline{I_0 R_1}$ параллельно вектору тока $\overline{I_0}$, а перпендикулярно к вектору $\overline{I_0 R_1}$ от его конца проводят вектор $\overline{I_0 X_{L1}} = -\overline{E_{p1}}$, уравновешивающий собой вектор электродвижущей силы самоиндукции $\overline{E_{p1}}$ (вектор $\overline{I_0 X_{L1}}$ изображает часть напряжения U_1 , расходуемого на создание этой электродвижущей силы).

Наконец, наносят вектор напряжения $\overline{U_1}$, соединяющий начало вектора $-\overline{E_1}$ с концом вектора $\overline{I_0 X_{L1}}$.

Геометрическая сумма активного и индуктивного падений напряжения дает вектор полного внутреннего падения напряжения в обмотке:

$$\overline{I_0 Z_1} = \overline{I_0 R_1} + \overline{I_0 X_{L1}}.$$

Прямоугольный треугольник abc называется треугольником внутреннего падения напряжения. Из треугольника можно получить треугольник сопротивлений, а из него и величину полного внутреннего сопротивления по формуле

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}.$$

Заменяв в равенстве (137) активное и индуктивное падения напряжения полным падением напряжения, получим

$$\overline{U_1} = (-\overline{E_1}) + \overline{I_0 Z_1}. \quad (138)$$

В этом виде равенство представляет собой уравнение двигательного режима, написанное в векторной форме. Первичная обмотка как приемник электрической энергии, обладающей собственной электродвижущей силой E_1 , подчиняется уравнению двигательного режима. Электродвижущая сила самоиндукции E_1 , возникающая в обмотке, выполняет роль противоэлектродвижущей силы.

§ 119. РЕЖИМ НАГРУЗКИ ТРАНСФОРМАТОРА

После включения вторичной обмотки на внешнюю цепь трансформатор переходит из режима холостого хода в режим нагрузки. Физические процессы, которые происходят в трансформаторе при этом режиме, заключаются в следующем.

С момента включения рубильника в цепи вторичной обмотки появляется ток нагрузки I_2 , который создает в трансформаторе свой магнитный поток. Большая часть Φ_2 этого потока замыкается по сердечнику трансформатора, а меньшая часть Φ_{p2} — по воздуху вокруг витков вторичной обмотки и составляет магнитный поток рассеяния.

Являясь индуктированным током, ток вторичной обмотки по правилу Ленца противодействует причине, его вызывающей, поэтому ослабляет в сердечнике рабочий магнитный поток трансформатора Φ_0 своим магнитным потоком Φ_2 из-за противоположного его направления.

Однако стоит только уменьшиться рабочему магнитному потоку, как это вызовет уменьшение противоэлектродвижущей силы, т. е. электродвижущей силы самоиндукции \bar{E}_1 в первичной обмотке, вследствие чего ток, поступающий в эту обмотку, увеличится. Увеличение тока подтверждается уравнением $\bar{U} = (-\bar{E}_1) + \bar{I}_0 \bar{Z}_1$ первичной обмотки.

Из уравнения находим

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{U} - (-\bar{E}_1)}{\bar{Z}_1}.$$

Ток в первичной обмотке увеличивается настолько по сравнению с током холостого хода, что создаваемый им дополнительный магнитный поток Φ_1 полностью компенсирует собой поток вторичной обмотки Φ_2 , поэтому рабочий магнитный поток в сердечнике остается почти без изменения (незначительно уменьшается).

С уменьшением тока во вторичной обмотке происходит обратная картина: магнитный поток вторичной обмотки Φ_2 уменьшается, противоэлектродвижущая сила увеличивается и этим уменьшает ток, потребляемый первичной обмоткой.

Таким образом, в трансформаторе автоматически изменяется величина тока, поступающего в первичную обмотку от источника тока, в соответствии с изменением нагрузки, т. е. тока, который потребляется внешней цепью из вторичной обмотки. Вследствие такого изменения тока в первичной обмотке и осуществляется переход энергии из одной обмотки в другую электромагнитным путем, т. е. за счет энергии магнитного поля, создаваемого током первичной обмотки.

Вторичная обмотка является источником тока при работе трансформатора под нагрузкой, поэтому подчиняется уравнению генераторного режима

$$\bar{E}_2 = \bar{U}_2 + \bar{I}_2 \bar{Z}_2, \quad (139)$$

где \bar{U}_2 — напряжение на зажимах обмотки;

$\bar{I}_2 \bar{Z}_2$ — полное внутреннее падение напряжения в обмотке.

Как и для первичной обмотки, полное внутреннее падение напряжения можно представить в виде геометрической суммы активного $\bar{I}_2 \bar{R}_2$ и индуктивного $\bar{I}_2 \bar{X}_{L2}$ падений напряжения:

$$\bar{I}_2 \bar{Z}_2 = \bar{I}_2 \bar{R}_2 + \bar{I}_2 \bar{X}_{L2},$$

где \bar{R}_2 и \bar{X}_{L2} — активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки.

Индуктивное падение напряжения $\bar{I}_2 \bar{X}_{L2}$ уравновешивает собой электродвижущую силу самоиндукции \bar{E}_{p2} , наводимую в обмотке магнитным потоком рассеяния Φ_{p2} . Подставив значение полного внутреннего падения напряжения в уравнение (139), получим

$$\bar{E}_2 = \bar{U}_2 + \bar{I}_2 \bar{R}_2 + \bar{I}_2 \bar{X}_{L2}.$$

На основании этого уравнения можно построить векторную диаграмму для трансформатора, работающего под нагрузкой. Диаграмму строят в следующем порядке.

После изображения векторов I_0 , Φ_0 , E_1 и E_2 (рис. 281) на диаграмму наносят вектор тока вторичной обмотки \bar{I}_2 , сдвинутый относительно вектора электродвижущей силы \bar{E}_2 этой обмотки на угол φ_2 . Этот угол задается внешней цепью ($\cos \varphi_2 = \frac{R}{Z}$, где R и Z — активное и полное сопротивления внешней цепи), и его следует откладывать между векторами \bar{I}_2 и \bar{U}_2 , а так как при построении диаграммы напряжение \bar{U}_2 неизвестно, то угол откладывают между векторами \bar{I}_2 и \bar{E}_2 . Ошибка при таком построении получается небольшая, так как вследствие незначительной величины полного внутреннего падения напряжения (2—3% от $U_{2н}$) электродвижущая сила \bar{E}_2 и напряжение \bar{U}_2 почти совпадают по фазе.

При наличии на диаграмме вектора тока \bar{I}_2 от конца вектора электродвижущей силы вторичной обмотки \bar{E}_2 проводят вектор индуктивного падения напряжения $\bar{I}_2 \bar{X}_{L2}$, направленный перпендикулярно к вектору тока \bar{I}_2 и противоположно к вектору электродвижущей силы самоиндукции \bar{E}_{p2} . Затем от начала вектора $\bar{I}_2 \bar{X}_{L2}$ проводят вектор активного падения напряжения $\bar{I}_2 \bar{R}_2$ параллельно вектору тока \bar{I}_2 и одинакового с ним направления. Вектор, соединяющий начала векторов \bar{E}_2 и $\bar{I}_2 \bar{R}_2$, будет вектором напряжения \bar{U}_2 на зажимах вторичной обмотки.

Для построения векторной диаграммы первичной обмотки необходимо вектор тока холостого хода сложить с вектором тока \bar{I}_1 , который своим магнитным потоком (дополнительным) компенсирует поток вторичной обмотки Φ_2 . На диаграмме вектор \bar{I}_1 должен иметь направление, противоположное к вектору \bar{I}_2 . По вектору \bar{I}_1 , равному геометрической сумме векторов \bar{I}_0 и \bar{I}_1' , строится векторная диаграмма первичной обмотки точно так же, как и по вектору тока холостого хода.

Векторная диаграмма, изображенная на рис. 281, построена для индуктивной нагрузки (ток I_2 отстает от напряжения U_2). Аналогично можно построить диаграммы и для

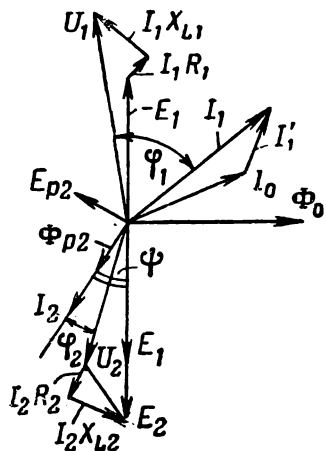


Рис. 281

других видов нагрузок (активной и емкостной). Нетрудно понять, что с увеличением нагрузки (тока I_2) напряжение на зажимах вторичной обмотки уменьшается за счет роста внутреннего падения напряжения $I_2 Z_2$.

В режиме холостого хода трансформатора внутреннее падение напряжения в первичной обмотке настолько незначительно (ток холостого хода составляет 5—8% номинального), что им вполне можно пренебречь и считать, что вольтметры, включенные на зажимы обмоток, измеряют их электродвижущие силы. На основании этого по ГОСТ 401—41 коэффициентом трансформации называется отношение напряжений, измеряемых на зажимах обмоток трансформатора в режиме холостого хода:

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (140)$$

Из последнего равенства следует, что для повышающего трансформатора $K < 1$, а для понижающего $K > 1$.

§ 120. ПОТЕРИ В ТРАНСФОРМАТОРЕ

В отличие от электрических машин, в трансформаторе имеются только потери в меди p_m и потери в железе $p_{ж}$, а механические потери отсутствуют. Поэтому к. п. д. трансформатора всегда выше, чем к. п. д. генератора переменного тока, при одинаковой мощности. У трансформаторов разной мощности к. п. д. колеблется от 80 до 99%. Числовое значение коэффициента полезного действия трансформатора определяется формулой

$$\eta_{\%} = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} \cdot 100 = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + \Sigma p} \cdot 100, \quad (141)$$

где $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$ — полезная мощность трансформатора, отдаваемая им во внешнюю цепь с зажимов вторичной обмотки;

$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ — потребляемая трансформатором (первичной обмоткой) мощность;

$\Sigma p = p_m + p_{ж}$ — потери в трансформаторе.

Полезная мощность трансформатора, как это видно из формулы $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$, зависит от величины $\cos \varphi$ его приемников, а так как значение $\cos \varphi$ бывает неизвестно при выпуске трансформатора, то в таблице паспортных данных всегда указывается полная, или кажущаяся, мощность трансформатора в киловольтамперах, т. е.

$$P_2 = U_2 I_2 \cdot 10^{-3} \text{ ква},$$

где U_2 и I_2 — номинальные значения тока и напряжения вторичной обмотки.

Если пренебречь потерями в трансформаторе, то для полных мощностей обеих обмоток можно написать

$$P_1 = P_2,$$

или

$$U_1 I_1 = U_2 I_2.$$

Разделив последнее равенство на $U_1 I_2$, получим

$$\frac{U_1 I_1}{U_1 I_2} = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_2},$$

или

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}. \quad (142)$$

Таким образом, токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны их напряжениям. Поэтому электрическую энергию экономически выгоднее передавать по проводам при более высоком напряжении, так как при этом получается меньше ток в проводах, а следовательно, требуется и меньшее поперечное сечение проводов.

§ 121. ТРЕХФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Трехфазный трансформатор от однофазного отличается только количеством обмоток или фаз. Такой трансформатор получают из трех одинаковых однофазных трансформаторов либо выполняют на общем сердечнике. Трансформатор на общем сердечнике был изобретен М. О. Доливо-Добровольским. С помощью трансформатора Доливо-Добровольский в 1891 году впервые осуществил передачу электрической энергии на расстояние 175 км под напряжением 25 000 в (в Германии между городами Лауфеном и Франкфуртом-на-Майне).

Трехфазный трансформатор состоит из наборного стального сердечника стержневого типа (рис. 282), трех одинаковых обмоток низкого напряжения и трех одинаковых обмоток высокого напряжения. На каждый стержень сердечника накладывается обмотка низкого напряжения, а поверх нее — обмотка высокого напряжения.

Для наложения обмоток на стержни сердечника его верхняя часть, называемая ярмом, делается съемной. Листы сердечника и ярма скрепляются боковыми накладками. Концы обмоток выводятся обычно на общий клеммовый щиток из изоляционного материала, укрепленный на ярме сердечника, и обозначаются буквами латинского алфавита, как это указано в табл. 18.

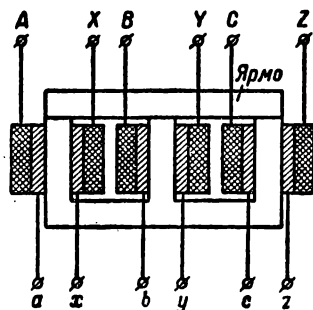


Рис. 282

Обозначение концов обмоток трансформаторов

Название выводов обмоток	Обмотки высокого напряжения			Обмотки низкого напряжения		
	1-я фаза	2-я фаза	3-я фаза	1-я фаза	2-я фаза	3-я фаза
Начало обмоток	A	B	C	a	b	c
Концы обмоток	X	Y	Z	x	y	z

Обмотки высокого и низкого напряжений могут соединяться либо в звезду (λ), либо в треугольник (Δ), либо в звезду с выведенной нулевой точкой (λ_0). На рис. 283 показаны две возможные схемы соединения обмоток.

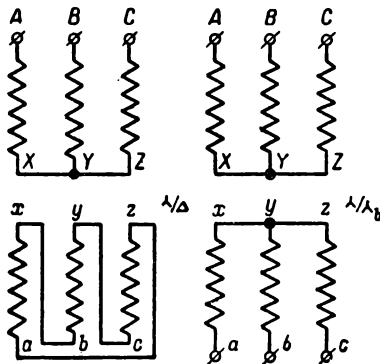


Рис. 283

Если обмотки трансформатора уже соединены между собой, то на щитке делается условное обозначение. Например, знак λ/Δ означает, что обмотки высокого напряжения соединены в звезду, а низкого — в треугольник.

Соединяя по той или иной схеме обмотки высокого и низкого напряжений трех одинаковых однофазных трансформаторов, можно также получить трехфазный трансформатор.

К подобным соединениям прибегают при мощных трансформаторах, когда для резерва на случай аварии в одной фазе трансформатора достаточно иметь один однофазный трансформатор вместо трехфазного, вдвое большего по мощности. Трансформаторы малой мощности, как правило, выполняются на общем сердечнике.

Физические процессы, происходящие в каждой фазе трансформатора, ничем не отличаются от процессов в однофазном трансформаторе. Мощность вторичных обмоток указывается кажущаяся (в киловольтамперах):

$$P = \sqrt{3}UI \cdot 10^{-3} \text{ киловольтампер.}$$

§ 122. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Автотрансформаторы от обычных трансформаторов отличаются тем, что у них вдвое меньше обмоток. Следовательно, однофазный автотрансформатор имеет всего одну

обмотку, а трехфазный — три вместо шести. Изобретен автотрансформатор М. О. Доливо-Добровольским в 1892 году.

По экономическим соображениям автотрансформаторы целесообразно применять при коэффициенте трансформации, не превышающем двух. На рис. 284 показано схематически устройство

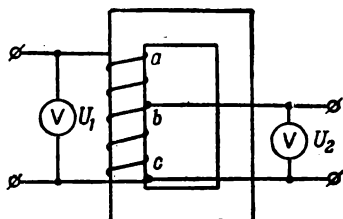


Рис. 284

однофазного автотрансформатора. Из рисунка видно, что единственная обмотка автотрансформатора является обмоткой высокого напряжения, обмотку же низкого напряжения составляет лишь часть этой обмотки (участок bc).

На холостом ходу автотрансформатор ничем не отличается от трансформатора, так как в его сердечнике создается рабочий магнитный поток Φ_0 , а в обмотках — электродвижущие силы $E_1 = 4,44f\omega_1\Phi_0$ и $E_2 = 4,44f\omega_2\Phi_0$; поэтому между напряжениями на зажимах обмоток автотрансформатора существует уже известная нам зависимость:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{W_1}{W_2} = K.$$

После включения автотрансформатора под нагрузку ток вторичной обмотки I_2 по правилу Ленца ослабляет своим магнитным потоком рабочий поток сердечника и поэтому имеет в обмотке направление, противоположное току I_1 , потребляемому автотрансформатором ($\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_1'$, § 119).

Таким образом, в общей части обмотки автотрансформатора (т. е. в части bc на рис. 284), относящейся к первичной и вторичной цепям, имеется разность токов I_1 и I_2 . Эта разность тем меньше, чем меньше коэффициент трансформации, при котором токи I_1 и I_2 незначительно отличаются один от другого. Благодаря разности токов в общей части обмотки эту часть можно выполнять из проволоки меньшего сечения по сравнению с остальной частью. В этом и заключается целесообразность применения автотрансформатора при $K < 2$, когда более половины обмотки можно сделать из проволоки меньшего сечения.

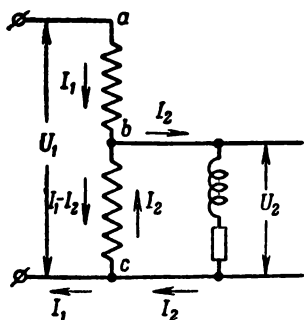


Рис. 285

Распределение токов в цепях автотрансформатора показано на рис. 285. Физические процессы в автотрансформаторе ничем не отличаются от процессов в обычном однофазном трансформаторе. При включении автотрансформатора под

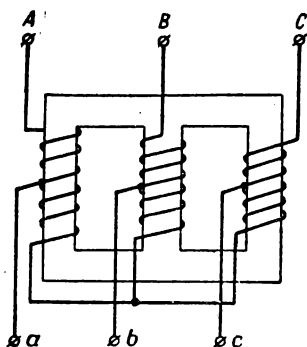


Рис. 286

нагрузку в нем, как и в трансформаторе, ток, потребляемый первичной обмоткой, увеличивается до значения $\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}'_1$, где I_0 — ток холостого хода, а I'_1 — составляющая, которая компенсирует собой размагничивающее действие тока нагрузки на магнитный поток сердечника. В результате магнитный поток почти не изменяется, поддерживая сравнительное постоянство электродвижущей силы во вторичной обмотке.

Несколько меньший расход меди на выполнение обмотки, а также более простое устройство автотрансформатора, безусловно, являются его преимуществами перед трансформатором. Однако автотрансформатор обладает и весьма существенным недостатком.

Недостаток заключается в том, что зажимы вторичной обмотки, а следовательно, и провода подключенной к ним сети все время находятся под потенциалом первичной обмотки вследствие электрической связи между обмотками. При высоком напряжении, подводимом к первичной обмотке, это может привести к несчастным случаям: человек, коснувшись руками оголенных проводов вторичной цепи, может быть поражен емкостным током. Во избежание несчастных случаев автотрансформатор применяется лишь для преобразования низких напряжений (не выше 220 в), менее опасных для жизни человека.

Устройство и схема соединения обмоток трехфазного автотрансформатора показаны на рис. 286. Обмотки высокого напряжения изображены соединенными в звезду, но их можно соединять и в треугольник в зависимости от номинального напряжения обмоток и величины преобразуемого напряжения. Физические процессы в трехфазном автотрансформаторе такие же, как и в однофазном.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ X

1. Что называется трансформатором и на чем основан принцип его действия?
2. Каково устройство однофазного трансформатора малой мощности?
3. Что называется первичной и вторичной обмотками трансформатора?
4. Какие физические процессы происходят в трансформаторе в режиме холостого хода?
5. Что называется коэффициентом трансформации?
6. Какие физические процессы происходят в трансформаторе под нагрузкой?
7. Каковы потери энергии в трансформаторе?
8. Каково соотношение между токами и напряжениями в обмотках трансформатора?
9. Как устроен трехфазный трансформатор?
10. В чем преимущество автотрансформаторов перед трансформаторами?

ГЛАВА XI

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

§ 123. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронный двигатель трехфазного тока — самый распространенный из всех электрических двигателей. В Советском Союзе асинхронные двигатели широко внедрены и продолжают все шире внедряться в различные области промышленности и сельского хозяйства. Такое широкое применение этих двигателей объясняется их преимуществами перед другими электрическими двигателями.

Существуют два типа асинхронных двигателей: двигатели с короткозамкнутой обмоткой на роторе и с фазной обмоткой. Двигатели первого типа называются также короткозамкнутыми асинхронными двигателями, а двигатели второго типа — двигателями с фазным ротором или с контактными кольцами. Оба типа двигателей были изобретены русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. и впоследствии подверглись лишь незначительным конструктивным изменениям.

По устройству двигатели различаются только выполнением роторной обмотки. Главными частями каждого асинхронного двигателя являются статор и ротор.

Статор (рис. 287) состоит из станины, стального сердечника и трех обмоток. Станина вместе с лапами для крепления к фундаменту отлита из чугуна; к ней прикрепляются все остальные части двигателя. Сердечник имеет форму полого цилиндра с продольными пазами на внутренней поверхности.

Для уменьшения вихревых токов сердечник набран из отдельных штампованных листов стали толщиной

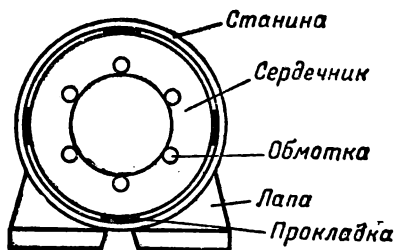


Рис. 287

0,5 мм. Внутри станины сердечник укреплен на прокладках из немагнитного материала, который не допускает образования магнитного поля в станине (поле может вызвать вихревые токи). В пазы сердечника уложены три совершенно одинаковые обмотки, или фазы.

Ротор короткозамкнутого двигателя состоит из стального вала, наборного сердечника из отдельных штампованных листов стали (рис. 288, а), короткозамкнутой обмотки в виде беличьего колеса (рис. 288, б) и вентилятора. Раньше роторная обмотка изготовлялась из медных стержней, которые плотно вставлялись в закрытые пазы

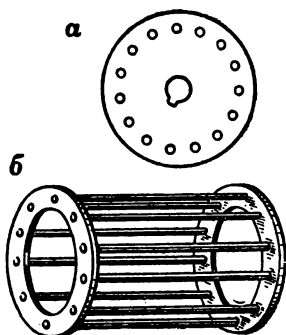


Рис. 288

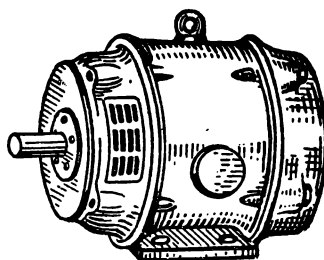


Рис. 289

сердечника ротора, а затем с обеих сторон соединялись между собой медными кольцами. В настоящее время для удешевления производства и экономии меди обмотка отливается прямо в роторе из алюминия, причем на боковых кольцах одновременно отливаются и лопасти вентилятора.

У двигателей с контактными кольцами сердечник ротора (наборный) имеет продольные пазы, как у якоря динамомашины, и в эти пазы уложены три одинаковые обмотки, или фазы, выполненные по типу статорных обмоток (т. е. смещенные на 120° своими началами и концами). Обмотки ротора соединены в звезду, а свободные концы припаяны к трем контактными кольцам, изолированно укрепленным на валу ротора.

С помощью щеток, укрепленных на боковом подшипниковом щите, контактные кольца соединяются с трехфазным реостатом, предназначенным для изменения сопротивления в фазах ротора. Трехфазный реостат состоит из трех ползунковых реостатов, соединенных в звезду. На стороне вала, противоположной контактными кольцам, укреплено вентиляционное колесо. Роторы двигателей удерживаются с помощью боковых подшипниковых щитов (с шарикоподшипниками), прикрепленных болтами к станине статора.

Внешний вид асинхронного короткозамкнутого двигателя типа АД изображен на рис. 289. Двигатели этого типа наиболее распространены на практике и имеют мощность 0,5—

12 кВт при номинальном напряжении фаз статора 127, 220 и 500 в.

Принцип работы асинхронных двигателей основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с токами, которые наводятся этим полем в роторной обмотке. Так, если фазы статора соединить в звезду или в треугольник и включить в них трехфазный ток, то в магнитной системе двигателя возникнет вращающееся магнитное поле. Это поле будет пересекать активные проводники роторной обмотки и наводить в них электродвижущие силы.

Под действием электродвижущих сил в короткозамкнутой обмотке ротора возникнут токи, которые, взаимодействуя с вращающимся полем, вызовут вращение ротора. На рис. 290 для простоты фазы статора показаны в виде трех витков, а роторная обмотка — состоящей только из двух активных проводников (a и b). Для указанного на рисунке направления вращения поля статора (по часовой стрелке) направление токов в проводниках ротора и направление сил, действующих на эти проводники, определены соответственно по правилам правой и левой руки.

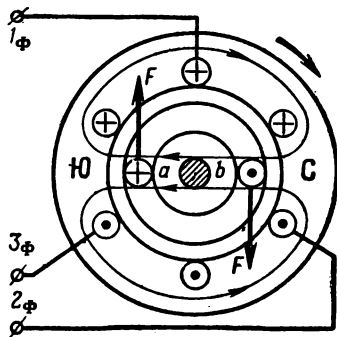


Рис. 290

Ротор двигателя с контактными кольцами также вращается под действием поля статора при условии, если щетки колец соединены с реостатом или просто закорочены для замыкания цепей обмоток ротора. При разомкнутых щетках токи в роторных обмотках отсутствуют, поэтому ротор не вращается.

У короткозамкнутых двигателей роторная обмотка не изолируется от сердечника, так как благодаря значительной разнице между удельными сопротивлениями алюминия и стали индуцированные токи, возникающие в обмотке, в основном замыкаются по ее стержням и кольцам.

§ 124. СКОЛЬЖЕНИЕ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Ротор асинхронного двигателя должен вращаться несколько медленнее, чем поле статора (отставать от него). Только при таком условии роторная обмотка будет пересекаться магнитным полем статора и в ней будут поддерживаться токи, необходимые для вращения ротора. Разность между числом оборотов $n_{ст}$ вращающегося магнитного поля статора и числом оборотов ротора n_p называется **скольжением** s в асинхронных

двигателях. Скольжение обычно выражают в долях единицы или в процентах от числа оборотов поля статора:

$$s = \frac{n_{\text{ст}} - n_{\text{р}}}{n_{\text{ст}}}, \text{ или } s_{\%} = \frac{n_{\text{ст}} - n_{\text{р}}}{n_{\text{ст}}} \cdot 100. \quad (143)$$

У двигателей разной мощности скольжение при полной нагрузке колеблется от 2 до 8%. Ввиду наличия разницы в числе оборотов ротора и поля статора двигатель и получил название асинхронного.

Число оборотов вращающегося магнитного поля статора определяется по известной уже нам формуле

$$n_{\text{ст}} = \frac{60f}{p},$$

где f — частота трехфазного тока, питающего статор;

p — число пар полюсов, на которое рассчитана статорная обмотка.

Эти обороты называются также синхронными оборотами.

Число оборотов ротора указывается в таблице паспортных данных (на заводском щитке), поэтому скольжение в двигателе всегда можно подсчитать. Так, если в таблице указано $n = 1440$, то это означает, что ротор двигателя при полной нагрузке должен делать 1440 *об/мин*. Ближайшее число синхронных оборотов поля статора согласно формуле $n_{\text{ст}} = \frac{60f}{p}$ при $p = 2$ и $f = 50$ *гц* равно 1500 *об/мин*. Следовательно, скольжение $s_{\%} = \frac{n_{\text{ст}} - n_{\text{р}}}{n_{\text{ст}}} \cdot 100 = \frac{1500 - 1440}{1500} \cdot 100 = 4\%$, а статорная обмотка двигателя выполнена на две пары полюсов.

§ 125. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ

Физические процессы, происходящие в асинхронном двигателе, во многом похожи на процессы в трансформаторе, а при неподвижном роторе ничем от них не отличаются. Рассмотрим эти процессы на примере двигателя с контактными кольцами.

Если затормозить ротор такого двигателя (чтобы он не вращался при прохождении тока), а затем включить в статор трехфазный ток, то со щеток ротора можно получать вторичное, т. е. преобразованное, напряжение для питания приемников, как и от обычного трехфазного трансформатора. Разница будет лишь в том, что у трансформатора первичные и вторичные обмотки пересекаются пульсирующим рабочим потоком сердечника Φ_0 , а у двигателя статорные (первичные) и роторные (вторичные) обмотки пересекаются потоком вращающегося магнитного поля статора $\Phi_{\text{ст}}$.

Кроме того, в трансформаторе рабочий магнитный поток сердечника ослабляется пульсирующим потоком вторичной обмотки, а в двигателе поток поля статора ослабляется потоком вращающегося магнитного поля ротора, которое создается трехфазным (индуктированным) током, возникающим в роторной обмотке как во вторичной. Из-за наличия воздушного зазора между ротором и статором ток холостого хода у двигателя получается значительно больше, чем у трансформатора, и для различных двигателей составляет 30—40 % номинального тока статора.

Электродвижущие силы, наводимые вращающимся магнитным полем статора в каждой фазе статора и ротора, определяются формулами:

$$E_{\text{CT}} = 4,44fW_{\text{CT}}\Phi_{\text{CT}} \text{ и } E_{\text{P}} = 4,44fW_{\text{P}}\Phi_{\text{CT}},$$

где $W_{\text{ст}}$ и $W_{\text{р}}$ — количества витков в фазах статора и ротора;
 $\Phi_{\text{ст}}$ — магнитный поток одного полюса поля статора;

$$f = \frac{pn}{60} \text{ — частота тока в обмотках статора.}$$

Кроме электродвижущих сил $E_{\text{ст}}$ и E_p , наводимых в фазах двигателя полем статора, в каждой фазе статора и ротора наводятся еще электродвижущие силы самоиндукции $E_{\text{ст.р}}$ и $E_{p.p}$ от потоков рассеяния, замыкающихся в основном вокруг лобовых соединений обмоток. Эти электродвижущие силы учитываются индуктивными сопротивлениями $X_{L\text{ст}}$ и X_{Lp} фаз двигателя.

Векторная диаграмма заторможенного асинхронного двигателя ничем не отличается от диаграммы трансформатора, работающего под нагрузкой.

Изменяя сопротивление трехфазного реостата, подключенного к щеткам ротора, в этом реостате можно получить любой ток в пределах номинального тока роторной обмотки, при этом, как и в трансформаторе, каждому значению тока будет соответствовать определенный ток, потребляемый фазами статора. Если полностью вывести сопротивление реостата, т. е. замкнуть щетки, то это будет равносильно короткому замыканию для трансформатора. В результате произойдет резкое увеличение токов в роторных и статорных обмотках, что опасно для их целостности.

Векторная диаграмма для случая короткого замыкания в заторможенном двигателе приведена на рис. 291. Из диаграммы видно, что электродвижущая сила фазы ротора целиком расходуется на преодо-

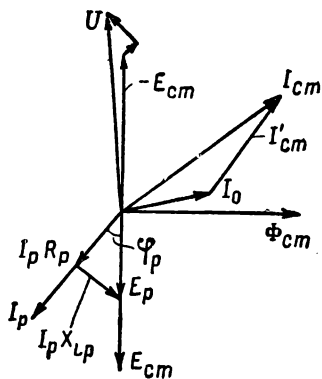


Рис. 291

ние активного R_p и индуктивного X_{Lp} сопротивлений фазы. Напряжение на зажимах фазы отсутствует ($U_p = 0$), так как она закорочена.

При полностью выведенном сопротивлении трехфазного реостата, т. е. при закороченных щетках, двигатель с контактными кольцами ничем не отличается от короткозамкнутого двигателя (поскольку также имеет короткозамкнутую обмотку). Поэтому все процессы, на которых мы будем в дальнейшем останавливаться, в одинаковой мере относятся к обоим типам двигателей.

Теперь выясним, что происходит в двигателе при его нормальной работе, т. е. при вращающемся роторе. Будем считать, что как при пуске двигателя, так и при вращении ротора его щетки остаются закороченными. Для пуска двигателя достаточно к обмотке статора подключить трехфазный ток, и ротор быстро разовьет нормальное число оборотов n_p .

Оказывается, что при вращающемся роторе физические процессы в двигателе отличаются от процессов в трансформаторе лишь уменьшением частоты тока в роторной обмотке. Происходит это потому, что вследствие скольжения в двигателе поле статора совершает относительно ротора уже не $n_{ст}$ оборотов, как при неподвижном роторе, а $n_{ст} - n_p$ оборотов, т. е. пересекает его фазы с гораздо меньшей скоростью, отчего частота тока в них уменьшается.

Зная относительную скорость вращения поля статора, т. е. его скорость относительно ротора $n_{ст} - n_p$, можно определить частоту тока в фазах вращающегося ротора по общей формуле

$$f_p = \frac{pn}{60} = \frac{p(n_{ст} - n_p)}{60} \text{ герц.}$$

Умножив числитель и знаменатель правой части равенства на $n_{ст}$, получим

$$f_p = \frac{n_{ст} - n_p}{n_{ст}} \frac{n_{ст}p}{60}.$$

Но $\frac{n_{ст} - n_p}{n_{ст}}$ представляет собой скольжение s , а $\frac{n_{ст}p}{60} = f$ — частота тока в фазах статора. Следовательно, частота тока в фазах ротора

$$f_p = fs. \quad (144)$$

Таким образом, частота тока ротора пропорциональна скольжению, так как частота тока в статоре является постоянной величиной, поддерживаемой источником трехфазного тока. Несмотря на разную частоту в статорных и роторных обмотках, магнитное поле, создаваемое токами ротора, продолжает вращаться в пространстве с такой же скоростью, что и поле статора, и ослабляет его по правилу Ленца.

Одинаковая скорость вращения поля ротора с полем статора при неподвижном роторе очевидна. Ведь частота токов во всех обмотках одинакова, а частотой определяется скорость вращения поля $n = \frac{60f}{p}$ при одинаковом числе пар полюсов, на которое выполнены обмотки (у двигателей с контактными кольцами роторная обмотка выполняется на такое же количество пар полюсов, как и статорная; у короткозамкнутых же двигателей поле статора также всегда создает в роторной обмотке столько полюсов, сколько и в обмотке статора).

При вращающемся роторе вместе с ним вращается и его поле со скоростью n_p об/мин. Кроме того, это поле вследствие частоты тока в роторе $f_p = \frac{p(n_{ст} - n_p)}{60}$ вращается относительно самого ротора со скоростью

$$n = \frac{60f_p}{p} = \frac{p(n_{ст} - n_p)}{60} \frac{60}{p} = n_{ст} - n_p,$$

т. е. со скоростью, на которую ротор отстает от поля статора. Поэтому полная скорость вращения поля ротора в пространстве

$$n_{рп} = n_p + n_{ст} - n_p = n_{ст}.$$

Как видим, синхронное вращение полей ротора и статора (т. е. вращение с одинаковой скоростью) сохраняется в двигателе независимо от того, находится ротор в покое или вращается. Благодаря этому физические процессы в фазах статора и при вращающемся роторе протекают так же, как и в трансформаторе. При всяком изменении тока в роторных обмотках (вследствие изменения тормозящего момента) происходит соответствующее изменение токов в статорных обмотках, необходимое для автоматической компенсации размагничивающего действия поля ротора.

Установим, в какой зависимости находятся электродвижущая сила и индуктивное сопротивление фазы ротора от скольжения в двигателе. Условимся названные величины при вращающемся роторе обозначать с индексом s , т. е. так: E_{ps} и X_{Lps} , а при неподвижном роторе — без этого индекса.

При неподвижном роторе, когда $f_p = f$, электродвижущую силу в любой фазе ротора можно определить по формуле

$$E_p = 4,44 f_p W_p \Phi_{ст},$$

или

$$E_p = 4,44 f W_p \Phi_{ст}.$$

При вращающемся роторе $f_p = fs$, поэтому

$$E_{ps} = 4,44 f W_p \Phi_{ст}s,$$

или

$$E_{ps} = E_p s. \quad (145)$$

Соответственно индуктивное сопротивление фазы ротора при неподвижном роторе

$$X_{Lp} = 2\pi f_p L_p = 2\pi f L_p s,$$

а при вращающемся роторе

$$X_{Lps} = 2\pi f L_p s = X_{Lp} s. \quad (146)$$

На основе равенств (145) и (146) можно определить величину тока в фазе ротора, а также величину $\cos \varphi$ по формулам

$$I_p = \frac{E_p s}{\sqrt{R_p^2 + X_{Lp}^2 s^2}} \quad (147)$$

и

$$\cos \varphi_p = \frac{R_p}{\sqrt{R_p^2 - X_{Lp}^2 s^2}}, \quad (148)$$

где φ_p — угол сдвига фаз между током и электродвижущей силой в фазе ротора (рис. 291).

Из полученных формул видно, что для роторной обмотки все величины, кроме активного сопротивления, зависят от скольжения. В этом характерная особенность физических процессов, происходящих в асинхронном двигателе, по сравнению с процессами в трансформаторе. На рис. 292 в качестве иллюстрации приводятся кривые, построенные на основе формул (145), (146), (147) и (148).

§ 126. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Вращающий момент асинхронного двигателя определяется по формуле

$$M_{вр} = c \Phi_{ст} I_p \cos \varphi_p, \quad (149)$$

где $\Phi_{ст}$ — магнитный поток поля статора (одного полюса);

I_p — ток в фазе ротора;

φ_p — угол сдвига фаз между током и электродвижущей силой фазы ротора;

c — постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей двигателя.

От формулы для вращающего момента двигателей постоянного тока эта формула отличается наличием $\cos \varphi_p$. Практический интерес представляет зависимость вращающего момента двигателя от его скольжения s . Для установления этой зависимости преобразуем формулу (149). Подставив в нее значения

$$I_p = \frac{E_p s}{\sqrt{R_p^2 + X_{Lp}^2 s^2}}$$

и

$$\cos \varphi_p = \frac{R_p}{\sqrt{R_p^2 + X_{Lp}^2 s^2}},$$

получим

$$M_{вp} = c \Phi_{ст} E_p \frac{s R_p}{R_p^2 + X_{Lp}^2 s^2}.$$

Но

$$E_p = 4,44 f W_p \Phi_{ст},$$

следовательно,

$$M_{вp} = c \cdot 4,44 f W_p \Phi_{ст}^2 \frac{s R_p}{R_p^2 + X_{Lp}^2 s^2}.$$

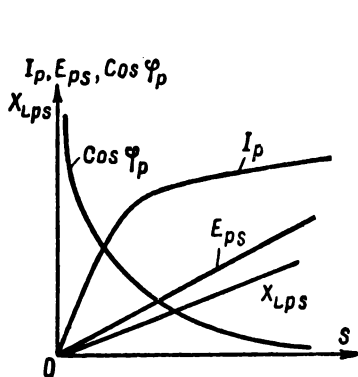


Рис. 292

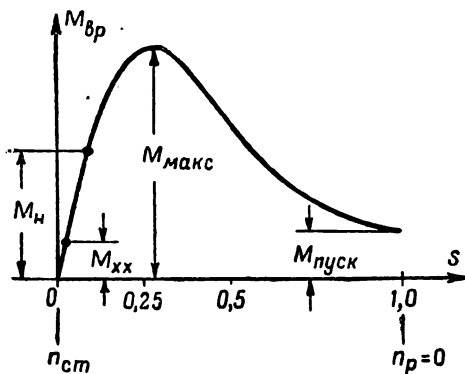


Рис. 293

Магнитный поток поля статора, как и в трансформаторе, изменяется настолько незначительно, что его можно считать постоянным. Поэтому окончательно для вращающего момента двигателя можно написать

$$M_{вp} = c' \frac{s R_p}{R_p^2 + X_{Lp}^2 s^2}, \quad (150)$$

где $c' = c \cdot 4,44 f W_p \Phi_{ст}^2$.

Эта зависимость вращающего момента от скольжения, графически изображенная на рис. 293, называется механической характеристикой или кривой вращающего момента асинхронного двигателя.

Кривая отображает собой физические процессы, происходящие в двигателе, и поэтому ей можно дать такое объяснение. В момент пуска двигателя в нем получается наибольшее скольжение ($s = 1$), поэтому частота $f_p = f_s$, а следовательно, электродвижущая сила E_{ps} , ток I_p и индуктивное сопротивление

ние X_{Lp} в фазах ротора достигают наибольших значений (рис. 292). Соответственно с токами ротора увеличиваются и токи, потребляемые статорными обмотками (как в трансформаторе). Опыт показывает, что пусковой ток у асинхронного двигателя в пять—шесть раз больше номинального тока. В этом один из существенных недостатков короткозамкнутых двигателей.

Несмотря на большой пусковой ток, пусковой вращающий момент $M_{\text{пуск}}$ у двигателя сравнительно мал, поэтому под нагрузкой двигатель может не развернуться (когда $M_{\text{торн}} > M_{\text{пуск}}$).

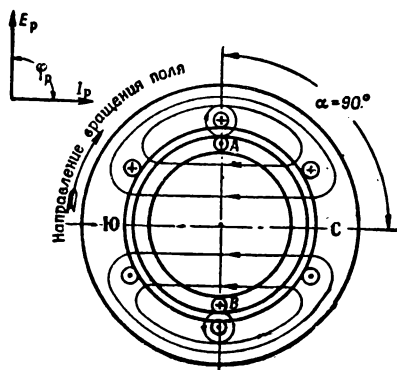


Рис. 294

Небольшой пусковой момент у двигателя объясняется тем, что из-за значительной величины индуктивного сопротивления X_{Lp} при пуске угол сдвига фаз φ_p между током и электродвижущей силой в фазе ротора получается близким к 90° . При таком угле сдвига фаз максимальное значение тока I_{mp} в проводниках A и B роторной обмотки (рис. 294)

будет в тот момент, когда поле статора серединой своих полюсов (где магнитная индукция максимальная) уже повернется относительно этих проводников на угол $\alpha = 90^\circ$, а проводники окажутся в зоне поля с самой слабой магнитной индукцией. Максимальное значение электродвижущей силы E_{mp} в проводниках A и B наступает, когда поле проходит их серединой своих полюсов.

Вследствие слабой магнитной индукции силы взаимодействия тока ротора с полем статора получаются небольшими, и это сказывается на величине пускового момента. В формуле $M_{вр} = c\Phi_{ст}I_p \cos \varphi_p$ ослабление сил взаимодействия от увеличения угла φ_p учитывается величиной $\cos \varphi$ ротора.

При пуске двигателя вхолостую тормозящий момент холостого хода M_{xx} незначителен ($M_{\text{пуск}} \gg M_{xx}$), поэтому ротор быстро разворачивается. Одновременно с разворотом ротора скольжение в двигателе уменьшается. Это приводит к уменьшению угла φ_p из-за уменьшения индуктивного сопротивления, поэтому вращающий момент двигателя продолжает увеличиваться, так как ток в роторе уменьшается медленно (рис. 292).

При некотором скольжении вращающий момент двигателя достигает максимального значения $M_{\text{макс}}$. Математически доказывается, что максимальный момент двигатель раз-

вивает при равенстве активного и индуктивного сопротивлений в фазах ротора, т. е. когда $R_p = X_{Lp}$.

При дальнейшем уменьшении скольжения вращающий момент резко уменьшается из-за быстрого уменьшения тока в фазах ротора (рис. 292). Число оборотов ротора перестает увеличиваться, когда вращающий момент двигателя становится равным тормозящему моменту холостого хода ($M_{вр} = M_{т.хх}$). На холостом ходу ротор двигателя развивает наибольшее возможное для него число оборотов.

Если теперь начать нагружать двигатель, прикладывая к валу ротора тормозящие моменты, то из-за нарушения равенства $M_{вр} = M_{т.хх}$ число оборотов двигателя несколько уменьшится (так как $M_{торм} > M_{вр}$), отчего скольжение увеличится, а вместе с ним увеличатся электродвижущая сила и ток в фазах ротора. Вследствие увеличения тока вращающий момент двигателя возрастет и равенство $M_{вр} = M_{торм}$ опять восстановится, но при несколько пониженном числе оборотов ротора. Однако с увеличением тока в роторе увеличится и размагничивающее действие поля ротора на поле статора, поэтому для компенсации поля ротора ток, потребляемый статором, также должен соответственно возрасти.

С уменьшением нагрузки картина получается обратная. Так, в асинхронном двигателе происходит передача электрической энергии электромагнитным путем из статора в ротор в соответствии с нагрузкой, т. е. с величиной тормозящего момента, приложенного к валу ротора.

Наличие максимального вращающего момента у асинхронного двигателя физически означает, что к нему можно прикладывать тормозящий момент только до определенного предела. При тормозящем моменте, превышающем максимальный момент, двигатель останавливается (при этом его нужно немедленно отключить от источника во избежание перегрева).

Максимальный вращающий момент ограничивает перегрузочную способность двигателя, под которой следует понимать отношение

$$k = \frac{M_{\text{макс}}}{M_n},$$

где M_n — номинальный вращающий момент, развиваемый двигателем при полной допустимой для него нагрузке.

У нормально выполненных асинхронных двигателей перегрузочная способность колеблется от 1,6 до 2,5. По сравнению с двигателями постоянного тока у асинхронных двигателей перегрузочная способность небольшая. Двигатели постоянного тока допускают пятикратную и более кратковременную перегрузку, не останавливаясь, но могут перегреться от большого тока.

§ 127. РЕГУЛИРОВКА ЧИСЛА ОБОРОТОВ И РЕВЕРСИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

По кривой вращающего момента асинхронного двигателя можно судить о том, как изменяется число оборотов двигателя с изменением нагрузки. Для этого достаточно по горизонтальной оси (рис. 295) наряду со скольжением отложить и число оборотов ротора, обратно пропорциональное скольжению.

Из рис. 295 видно, что изменение числа оборотов двигателя, т. е. $\Delta n = n_{pxx} - n_{pn}$, зависит от крутизны участка ab

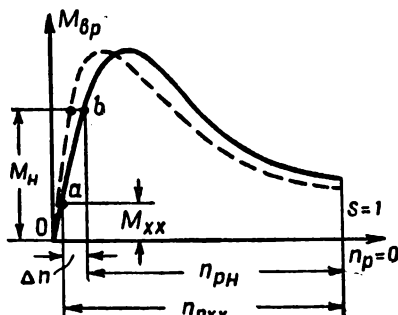


Рис. 295

кривой, на котором работает двигатель в пределах от тормозящего момента холостого хода до номинальной нагрузки. Чем круче этот участок, тем меньше изменяется число оборотов двигателя. Крутизна участка определяется величиной активного сопротивления фазы ротора R_p . С уменьшением сопротивления крутизна возрастает.

Объясняется это тем, что максимальный вращающий момент двигателей наступает при равенстве $R_p = X_{Lp}s$, поэтому чем меньше активное сопротивление фазы ротора, тем при меньшем скольжении наступает и равенство сопротивлений, в результате чего максимальный вращающий момент перемещается влево (см. пунктирную кривую) и повышает крутизну кривой. Чем мощнее двигатель, тем меньше у него активное сопротивление фазы ротора, тем круче получается кривая вращающего момента и тем меньше изменяется число оборотов. У двигателей разной мощности изменение числа оборотов Δn при полной нагрузке колеблется от 1 до 6%.

Благодаря свойству асинхронного двигателя развивать максимальный вращающий момент при равенстве активного и индуктивного сопротивления, число оборотов у двигателей с контактными кольцами можно регулировать изменением активного сопротивления в фазах ротора. Действительно, если с помощью реостата постепенно увеличивать сопротивление в фазах ротора, то равенство $R_p = X_{Lp}s$ будет наступать при большем скольжении. В соответствии с этим кривые вращающего момента при различных сопротивлениях реостата ($R_{p4} > R_{p3} > R_{p2} > R_{p1}$) будут уменьшать свою крутизну (рис. 296) вследствие того, что максимальный вращающий момент будет перемещаться все правее. Из рис. 296 видно, что изменение крутизны кривой вращающего момента приводит

к изменению числа оборотов двигателя ($n_{p4} < n_{p3} < n_{p2} < n_{p1}$), работающего при неизменной нагрузке ($M_{\text{торм}} = M_{\text{вр}} = \text{const}$).

Следовательно, для уменьшения числа оборотов двигателя необходимо с помощью регулировочного реостата увеличить активное сопротивление в фазах ротора. Однако такая регулировка неэкономична, так как приводит к значительному расходу энергии в реостате, поэтому на практике к ней прибегают редко.

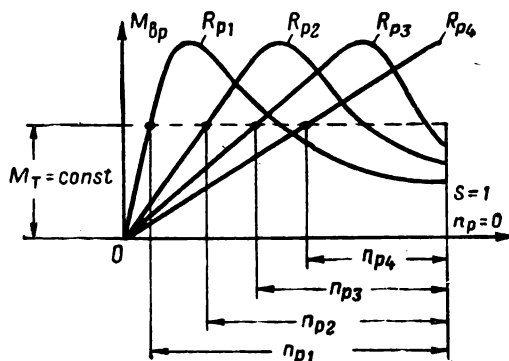


Рис. 296

Реверсирование асинхронных двигателей производят путем изменения направления вращающегося магнитного поля статора, для чего меняют местами два любых линейных привода, питающих статор. При частом реверсировании двигателей пользуются трехполюсным переключателем.

§ 128. СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Асинхронные двигатели с контактными кольцами и короткозамкнутые двигатели обладают различными свойствами.

Двигатели с контактными кольцами имеют более сложное устройство ротора, из-за чего увеличивается их стоимость. Кроме того, они требуют при работе дополнительного регулировочного реостата. Короткозамкнутые двигатели по устройству значительно проще, и в этом их преимущество перед двигателями с контактными кольцами.

Однако двигатели с контактными кольцами допускают регулировку числа оборотов и дают возможность уменьшать пусковые токи путем увеличения сопротивления в фазах ротора с помощью реостата. У короткозамкнутых двигателей регулировать число оборотов и уменьшать пусковые токи таким путем невозможно, и в этом их существенный недостаток.

Несмотря на отдельные недостатки, короткозамкнутые двигатели более распространены на практике благодаря простоте устройства, надежности действия и более высокому коэффициенту полезного действия (вследствие небольшого сопротивления в роторной обмотке). Они широко применяются в промышленности в качестве индивидуальных приводов для вращения отдельных узлов и механизмов сложных станков и специальных машин. Двигатели мощностью до 20 кВт при пуске непосредственно включаются в сеть трехфазного тока без всяких дополнительных устройств, уменьшающих пусковые токи.

Двигатели с контактными кольцами в качестве привода в настоящее время применяются редко и главным образом в тех случаях, когда необходима регулировка числа оборотов.

Асинхронные двигатели, как и все электрические машины, обладают высоким коэффициентом полезного действия, который в зависимости от мощности двигателей колеблется от 80 до 95 %. Числовое значение коэффициента полезного действия определяется формулой

$$\eta_{0,0} = \frac{P - \sum p}{P},$$

где $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$ — мощность, потребляемая двигателем;
 $\sum p = p_m + p_{ж} + p_{мех}$ — потери мощности в двигателе.

§ 129. ВКЛЮЧЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В СЕТЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Для правильного включения асинхронного двигателя в сеть трехфазного тока необходимо установить, как соединить фазы статора (в звезду или в треугольник), чтобы обеспечить им номинальное напряжение. Способ соединения фаз устанавливается по линейному напряжению $U_{л}$ сети трехфазного тока, от которой должен питаться двигатель, и по паспортным данным двигателя.

Линейное напряжение бывает обычно известно, и его в крайнем случае можно измерить вольтметром. В низковольтных сетях трехфазного тока линейное напряжение бывает 220 или 380 в.

В паспортных данных двигателя напряжение указывается двумя числами в виде дроби, например: 127/220 или 220/380. Каждое из чисел означает величину линейного напряжения сети, на которое можно включать данный двигатель, а меньшее число, кроме того, означает величину номинального напряжения фазы статора двигателя.

Если линейное напряжение сети и номинальное напряжение фазы известны, то установить способ соединения фаз статора уже нетрудно. Рассмотрим несколько примеров.

Пусть линейное напряжение сети $U_{\text{л}} = 220 \text{ в}$, паспортные данные: 127/220 в. Номинальное напряжение фазы двигателя $U_{\text{ф}} = 127 \text{ в}$. Соединять фазы данного двигателя в треугольник (рис. 297, а) нельзя, так как при этом они получают по 220 в и могут перегореть из-за сильного тока. Следовательно, в данном случае фазы двигателя нужно соединить в звезду (рис. 297, б). При этом каждая фаза получит

$$U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{1,73} = 127 \text{ в},$$

т. е. необходимое номинальное напряжение.

Другой пример: $U_{\text{л}} = 220 \text{ в}$, паспортные данные: 220/380 в. Очевидно, у такого двигателя фазы нужно соединить только в треугольник, так как при соединении фаз в звезду каждая фаза получит 127 в, т. е. в $\sqrt{3}$ раз меньше номинального напряжения.

Еще один пример: $U_{\text{л}} = 380 \text{ в}$, паспортные данные: 127/220 в. Этот двигатель вообще нельзя включать в сеть с линейным напряжением 380 в, так как даже если его фазы

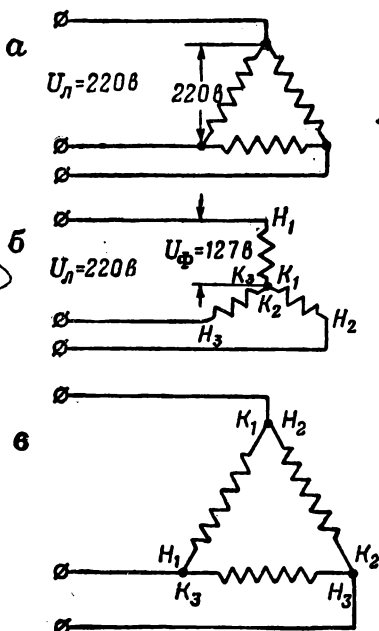


Рис. 297

соединить в звезду, то каждая фаза получит 220 в ($U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1,73} = 220$), т. е. больше номинального напряжения.

После того как способ соединения фаз установлен, необходимо приступить к непосредственному соединению фаз. Для этого нужно точно знать начала H и концы K каждой фазы.

Чтобы получить в статоре вращающееся магнитное поле, при соединении фаз в звезду все начала либо все концы фаз нужно соединить в нулевой точке, а при соединении фаз в треугольник их необходимо соединить так, как показано на рис. 297, в. В случае неправильного соединения хотя бы одной фазы статора направления мгновенных токов в этой фазе изменятся на противоположные и вращающегося магнитного поля в статоре не получится.

Для удобства соединения фаз статора в звезду и в треугольник зажимы с концами фаз на клеммовом щитке двига-

теля располагают в определенном порядке, как показано на рис. 298, а. При таком расположении выводов для соединения фаз в звезду необходимо поставить между зажимами две горизонтальные перемычки (рис. 298, б), а для соединения в треугольник — три вертикальные перемычки (рис. 298, в).

Иногда концы фаз выводятся через три резиновые трубки по два конца в каждой трубке (рис. 299). При этом фазы удобно соединять в треугольник.

Для соединения фаз в звезду (если начала и концы не имеют наружной оплетки разных цветов) можно соединить по одному концу из каждой трубки в нулевую точку и попробовать запустить двигатель. Если он не пойдет, то необходимо

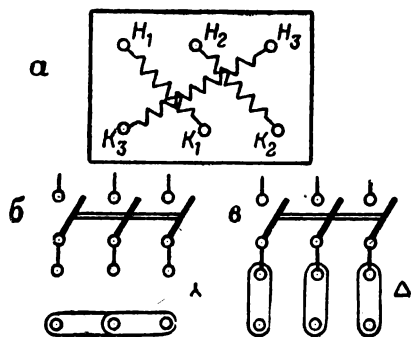


Рис. 298

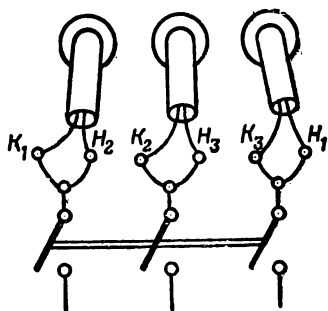


Рис. 299

поочередно менять концы одной из двух любых трубок и каждый раз запускать двигатель. В худшем случае пуск придется попробовать три раза.

Можно, пользуясь пяти- или шестивольтовой батареей, выводы каждой фазы определить по искре, а затем, зная, что в каждой трубке имеются начало и конец двух различных фаз, точно установить начало и конец каждой фазы. Однако этот способ отнимает больше времени.

§ 130. ИНДУКЦИОННЫЙ РЕГУЛЯТОР ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Индукционным регулятором или потенциал-регулятором называется электрическая машина, которая дает возможность плавно изменять действующее значение переменного напряжения в требуемых пределах. По роду тока потенциал-регуляторы бывают однофазные и трехфазные.

Рассмотрим работу и схему включения трехфазного потенциал-регулятора, более распространенного на практике.

По устройству потенциал-регулятор почти ничем не отличается от асинхронного двигателя с фазным ротором. Разни-

ца лишь в том, что у него нет вентилятора, а ротор заторможен червячной передачей. Червячное колесо крепится на валу ротора шпонкой, а червяк вместе с обоймой — на подшипниковом щите. При помощи маховичка, насаженного на свободный конец вала червяка, ротор можно поворачивать в обе стороны на любой угол.

При включении потенциал-регулятора в сеть трехфазного тока обмотки статора и ротора (через контактные кольца) присоединяются к линейным проводам сети (рис. 300). Свободные концы обмоток статора (a' , b' и c') служат зажимами потенциал-регулятора, с которых и снимается линейное напряжение, изменяемое по величине. Это напряжение называют также выходным напряжением потенциал-регулятора ($U_{\text{вых}}$).

Выясним сначала, что происходит в потенциал-регуляторе при отключенном от сети роторе.

Если пренебречь падением напряжения в линейных проводах и статорных обмотках, а также принять, что фазы генератора, питающего сеть, соединены в звезду, то зажимы потенциал-регулятора можно рассматривать одновременно как зажимы генератора. В таком случае для выходного напряжения потенциал-регулятора можно написать

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}},$$

где $U_{\text{л}}$ — линейное напряжение сети;

$U_{\text{ф}}$ — фазовое напряжение генератора.

При включенном роторе картина изменяется. Дело в том, что токи роторных обмоток создают в потенциал-регуляторе вращающееся магнитное поле. Это поле пересекает статорные обмотки и наводит в них электродвижущие силы ($E_{\text{ст}}$), равные по величине, но сдвинутые по фазе на 120° (как и фазовые напряжения генератора, питающего сеть).

Следовательно, в каждой фазе генератора, если его зажимами считать зажимы потенциал-регулятора, появляется дополнительная электродвижущая сила $E_{\text{ст}}$, которая вместе с фазовым напряжением $U_{\text{ф}}$ генератора создает результирующее фазовое напряжение $U_{\text{рез}}$. Величина этого напряжения определяется геометрическим равенством

$$\bar{U}_{\text{рез}} = \bar{U}_{\text{ф}} + \bar{E}_{\text{ст}}.$$

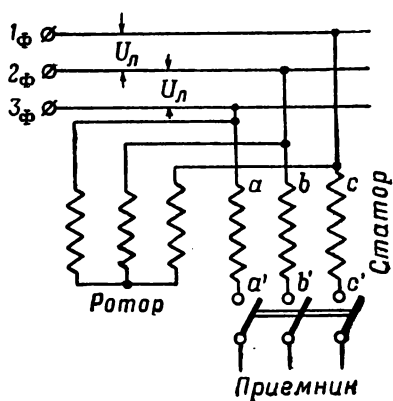


Рис. 300

В соответствии с новым значением фазового напряжения выходное напряжение потенциал-регулятора

$$\bar{U}_{\text{вых}} = \sqrt{3} \bar{U}_{\text{рез}} = \sqrt{3} (\bar{U}_{\phi} + \bar{E}_{\text{ст}}).$$

Сравнивая последнее равенство с равенством $U_{\text{вых}} = \sqrt{3} U_{\phi}$, видим, что величина выходного напряжения у потенциал-регулятора отличается от линейного напряжения сети, к которой он подключен.

Величина результирующего фазового напряжения зависит от угла сдвига фаз между электродвижущей силой $E_{\text{ст}}$ статорной обмотки потенциал-регулятора и фазовым напряжением U_{ϕ} генератора, а этот угол в свою очередь зависит от положения ротора относительно статора.

Действительно, при повороте ротора маховичком в ту или иную сторону вместе с ним дополнительно поворачивается и вращающееся поле в ту же сторону и на такой же угол.

Вследствие дополнительного поворота поля моменты наведения им максимальных значений электродвижущих сил в обмотках статора в течение периода изменяются, а это и дает возможность получать различные углы сдвига фаз между электродвижущей силой в обмотке статора и фазовым напряжением генератора.

Очевидно, что при некотором положении ротора электродвижущие силы в обмотках статора потенциал-регулятора совпадут по фазе с фазовыми напряжениями генератора. В этом случае, как видно из векторной диаграммы (рис. 301, а), результирующее фазовое напряжение получается наибольшим и его численное значение определяется равенством

$$U_{\text{рез. макс}} = U_{\phi} + E_{\text{ст}},$$

так как геометрическая сумма векторов \bar{U}_{ϕ} и $\bar{E}_{\text{ст}}$ равна их арифметической сумме. Наибольшему значению результирующего фазового напряжения соответствует и наибольшее выходное напряжение потенциал-регулятора:

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{3} U_{\text{рез}} = \sqrt{3} (U_{\phi} + E_{\text{ст}}).$$

Если теперь ротор поворачивать в какую-либо сторону в пределах угла в 180° , то угол сдвига фаз (φ) между электродвижущей силой $E_{\text{ст}}$ и фазовым напряжением U_{ϕ} будет соответственно возрастать от 0 до 180° .

Вследствие увеличения угла φ результирующее фазовое напряжение $U_{\text{рез}}$ начнет уменьшаться из-за уменьшения геометрической суммы векторов \bar{U}_{ϕ} и $\bar{E}_{\text{ст}}$ (рис. 301, а). При $\varphi = 180^{\circ}$ результирующее фазовое напряжение будет наименьшим (рис. 301, б) и его численное значение определится равенством

$$U_{\text{рез. мин}} = U_{\phi} - E_{\text{ст}},$$

так как геометрическая сумма векторов \vec{U}_ϕ и $\vec{E}_{ст}$ равна их арифметической разности.

Выходное напряжение потенциал-регулятора

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{3} U_{\text{рез}} = \sqrt{3} (U_\phi - E_{ст})$$

при $\varphi = 180^\circ$ также будет наименьшим.

Таким образом, выходное напряжение на зажимах потенциал-регулятора можно изменять поворотом ротора в пределах

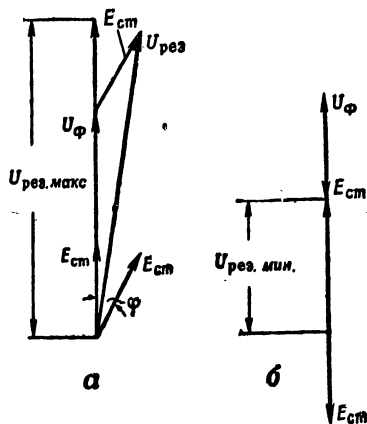


Рис. 301

$$U_{\text{вых. макс}} = \sqrt{3} (U_\phi + E_{ст}) \text{ и } U_{\text{вых. мин}} = \sqrt{3} (U_\phi - E_{ст}).$$

Подставляя в эти равенства $U_\phi = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$, получим:

$$U_{\text{вых. макс}} = U_{\text{л}} + \sqrt{3} E_{ст} \text{ и } U_{\text{вых. мин}} = U_{\text{л}} - \sqrt{3} E_{ст}.$$

Последние две формулы показывают, что пределы изменения выходного напряжения у потенциал-регулятора можно получить различными путем выбора величины электродвижущей силы в обмотках статора при расчете потенциал-регулятора. Величина же электродвижущей силы определяется общей формулой

$$E_{ст} = 4,44 f W_{ст} \Phi_p,$$

где f — частота тока сети;

$W_{ст}$ — количество витков в фазе статора;

Φ_p — магнитный поток вращающегося магнитного поля ротора.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ XI

1. На чем основан принцип работы асинхронного двигателя трехфазного тока?
2. Чем конструктивно отличается короткозамкнутый асинхронный двигатель от двигателя с фазным ротором?
3. Что называется скольжением в асинхронных двигателях и как его можно определить?
4. В чем сходство физических процессов, протекающих в асинхронном двигателе и в трансформаторе?

5. От чего зависит величина вращающего момента в асинхронном двигателе?
 6. Каковы свойства короткозамкнутого асинхронного двигателя и двигателя с фазным ротором?
 7. Как производится реверсирование асинхронных двигателей?
 8. Каков порядок включения асинхронного двигателя в сеть трехфазного тока?
 9. Каковы назначение и устройство индукционного регулятора трехфазного тока?
 10. Как достигается регулировка напряжения с помощью индукционного регулятора?
-

ГЛАВА XII

ГЕНЕРАТОР ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

§ 131. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ГЕНЕРАТОРА

Первый в мире трехфазный генератор был изобретен и построен русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским в 1890 г. За 60 с небольшим лет, прошедших с этого времени, трехфазный ток настолько внедрился во все области человеческой деятельности, что генераторы трехфазного тока стали единственными источниками электрической энергии, которыми оборудуются современные мощные электрические станции.

Принцип действия генератора трехфазного тока основан на явлении электромагнитной индукции. В гл. VI «Трехфазный ток» кратко пояснялось устройство генератора, а также создание в его обмотках электродвижущих сил.

Из всех типов трехфазных генераторов, выпускаемых нашей промышленностью, мы рассмотрим генераторы серии СГ, мощностью 15—60 *кв*а, предназначенные для работы на передвижных электрических станциях. Внешний вид генератора изображен на рис. 302.

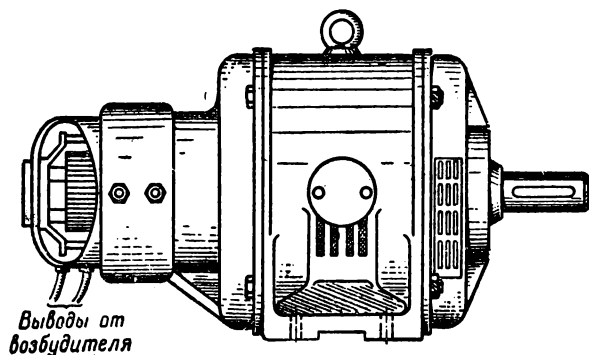


Рис. 302

Статор генератора по устройству ничем не отличается от статора трехфазного асинхронного двигателя. Обмотки статора выполняются на номинальные напряжения в 130 или 230 в, что при соединении обмоток в звезду дает линейные напряжения соответственно в 230 и 400 в.

Ротор генератора имеет явно выраженные полюсы. Он состоит из стального вала, стальной втулки, полюсов, вентилятора и двух контактных колец, через которые подводится ток в обмотку возбуждения (см. рис. 304).

Сердечники полюсов наборные (рис. 303), как и у генераторов постоянного тока, и вместе с намагничивающими катушками закреплены на стальной втулке болтами. Втулка

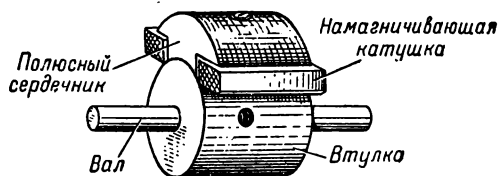


Рис. 303

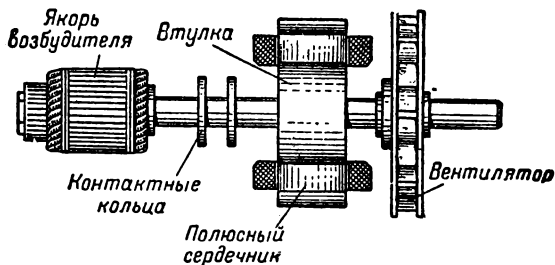


Рис. 304

удерживается на валу шпонкой. Полюсные катушки соединены между собой последовательно и образуют обмотку возбуждения ротора. Концы обмотки припаяны к контактным кольцам (бронзовым или медным), изолированно укрепленным на валу (рис. 304). Вентилятор у генератора центробежного типа.

На валу ротора укреплен и якорь возбuditеля (рис. 304) — небольшого генератора постоянного тока для питания обмотки возбуждения ротора. Вал якоря выполнен в виде втулки, насаженной на вал ротора и закрепленной с помощью шпонки и гайки. Мощность возбuditеля не превышает 2% мощности генератора.

К вспомогательным частям генератора относятся боковые подшипниковые щиты с шарикоподшипниками (для удержания вала ротора), щеточный механизм и клеммовый щиток с выводами концов обмоток статора.

Боковой щит со стороны якоря возбuditеля изготовляется из стали и используется в качестве станины индуктора возбuditеля (рис. 305). На внутренней поверхности щита находятся полюсы. Для доступа к коллектору в щите имеются окна.

Боковой щит со стороны вентилятора имеет щели для выхода воздуха; щели закрыты металлической решеткой.

Щеточный механизм ротора состоит из двух пальцев со щеткодержателями и щетками. Пальцы щеткодержателей укреплены изолированно на боковом подшипниковом щите, а щетки плотно прижимаются к контактным кольцам ротора. Ток к щеткам подводится непосредственно от щеток возбuditеля соединительными проводами. Регулировка тока в роторной обмотке осуществляется изменением тока в шунтовой обмотке возбuditеля. Для подключения регулировочного реостата к возбuditелю имеются два вывода — один от зажима якоря, а другой от шунтовой обмотки (рис. 302).

На клеммовом щитке имеется шесть зажимов, соединенных с концами статорных обмоток. Щиток прикрыт металлической крышкой.

Электрическая схема генератора изображена на рис. 306.

Генераторы трехфазного тока называются также синхронными генераторами, так как роторы генераторов совершают вполне определенное число оборотов в минуту, необходимое для получения стандартной частоты 50 гц.

У генераторов серии СГ роторы выполняются на две или на три пары полюсов, поэтому должны вращаться со скоростью 1500 или 1000 об/мин, как это следует из формулы $n = \frac{60f}{p}$. Синхронные генераторы других серий отличаются

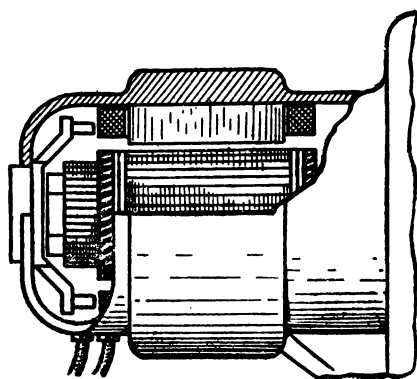


Рис. 305

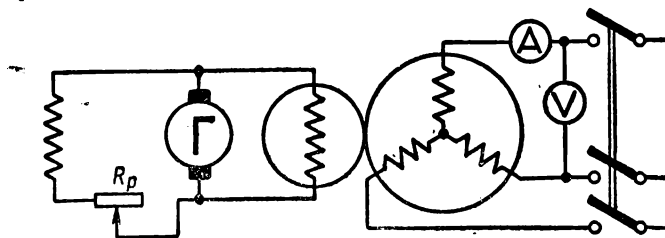


Рис. 306

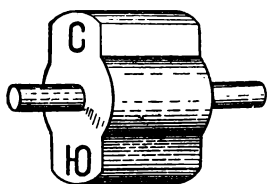


Рис. 307

лишь устройством ротора и расположением его вала в пространстве.

В особую группу следует отнести магнитоэлектрические генераторы, у которых ротор не имеет обмотки возбуждения и выполняется в виде сильного постоянного магнита (рис. 307). Такие генераторы предназначены для специальных целей и рассчитываются на небольшую мощность. Недостаток генераторов в том, что они не допускают регулировки напряжения обычным путем.

§ 132. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ГЕНЕРАТОРА

Под электродвижущей силой синхронного генератора следует понимать действующее значение электродвижущей силы, возникающей в одной фазе статора при пересечении ее магнитным потоком ротора. Действующее значение электродвижущей силы в фазе (см. § 71) определяется по формуле

$$E = 4,44fW\Phi,$$

где $f = \frac{pn}{60}$ — частота изменения электродвижущей силы, задаваемая ротором;

W — число витков в фазе статора;

Φ — магнитный поток, проходящий через один полюс ротора, в вольт-секундах.

Из формулы следует, что у синхронного генератора, в отличие от генератора постоянного тока, электродвижущую силу можно изменять только путем изменения магнитного потока ротора (изменением тока в обмотке возбуждения ротора).

§ 133. РЕАКЦИЯ СТАТОРА

При работе синхронного генератора на холостом ходу в его магнитной системе имеется только одно магнитное поле — поле ротора, под действием которого в фазах статора индуцируются электродвижущие силы.

После включения генератора под нагрузку в фазах появляется трехфазный ток, который создает в той же магнитной системе машины вращающееся магнитное поле статора (§ 82). Воздействие этого поля на поле ротора и называется реакцией статора в синхронных генераторах.

В отличие от реакции якоря в машинах постоянного тока реакция статора зависит не только от действующего значе-

ния токов в фазах, но и от характера нагрузки генератора, что определяется величиной и знаком угла сдвига фаз φ между фазовыми значениями тока и напряжения.

Рассмотрим реакцию статора при различных нагрузках на примере однофазного синхронного генератора, который отличается от трехфазного лишь тем, что имеет в статоре только одну обмотку или фазу. Будем считать также, что обмотка статора выполнена в виде одного витка. Из-за наличия переменного тока в обмотке генератора реакцию статора следует рассматривать при максимальном значении тока, когда поле статора наиболее сильно воздействует на поле ротора.

Взаимное расположение полей ротора и статора при различных нагрузках можно установить следующим образом.

Если пренебречь внутренним падением напряжения в статорной обмотке (оно не превышает 3—4% электродвижущей силы), то можно считать, что электродвижущая сила генератора и напряжение равны и совпадают по фазе. При таком условии положение полюсов ротора относительно обмотки статора в момент максимального тока в ней определяется углом сдвига фаз φ между током и напряжением, так как максимальная электродвижущая сила в обмотке генератора наводится в тот момент, когда ротор пересекает активные стороны обмотки серединой своих полюсов (где наибольшая магнитная индукция).

При активной нагрузке ток совпадает по фазе с напряжением и с электродвижущей силой генератора (при нашем допущении). Следовательно, в момент максимального тока в обмотке статора ротор должен располагаться так, как показано на рис. 308, а, и наводить в обмотке наибольшую электродвижущую силу.

Из рисунка видно, что под действием поля статора набегающий край полюса ротора размагничивается, а сбегающий подмагничивается, как и в генераторе постоянного тока. В результате магнитное поле ротора лишь искажается (рис. 308, б), а величина его магнитного потока не изменяется,

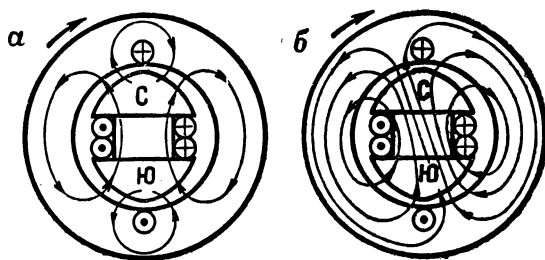


Рис. 308

В случае индуктивной нагрузки ток отстает от напряжения на угол φ , поэтому максимальный ток в обмотке получается лишь после того, как ротор серединой своих полюсов повернется относительно обмотки на тот же угол (рис. 309, а). При таком расположении ротора магнитное поле статора разматничивает ротор и ослабляет его магнитный поток.

При емкостной нагрузке ток опережает напряжение на угол φ и вследствие этого достигает максимального значения, когда ротор еще не доходит серединой полюсов до обмотки статора на угол φ . В этом случае поле статора, наоборот, подмагничивает ротор и увеличивает его магнитный поток (рис. 309, б).

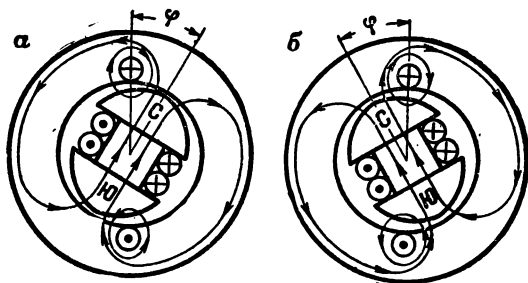


Рис. 309

Нетрудно понять, что с увеличением действующего значения тока при всех рассмотренных нами нагрузках реакция статора проявляется сильнее, так как поле усиливается. Итак, можно сделать вывод, что в синхронном генераторе реакция статора сводится лишь к изменению магнитного потока ротора, что приводит к изменению и электродвижущей силы генератора.

На практике реактивное действие поля статора на поле ротора устраняется соответствующим изменением тока возбуждения в роторной обмотке либо вручную, либо специальным регулятором напряжения, который автоматически изменяет сопротивление регулировочного реостата.

§ 134. ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА

Внешняя характеристика синхронного генератора представляет собой кривую зависимости напряжения на зажимах одной фазы статора (т. е. фазового напряжения) от тока нагрузки (фазового тока) при неизменном токе возбуждения в роторной обмотке и постоянном числе оборотов ротора.

Порядок снятия данных для построения характеристики такой же, как и для генераторов постоянного тока: после

пуска и возбуждения генератора ему дают номинальную нагрузку при номинальном напряжении, а затем нагрузку постепенно доводят до нуля и при этом записывают значения тока и напряжения.

На рис. 310 приведены внешние характеристики генератора для трех различных нагрузок (активной, индуктивной и емкостной).

Наличие общей точки A у характеристик объясняется тем, что при снятии данных для всех видов нагрузки при номинальном токе внешней цепи $I_{\phi, \text{ном}}$ устанавливается одинаковое номинальное напряжение $U_{\phi, \text{ном}}$ на зажимах фазы с помощью регулировочного реостата в цепи обмотки возбуждения ротора.

О различной величине тока возбуждения при различных нагрузках свидетельствуют разные значения напряжения холостого хода. Из рисунка видно, что наибольшее напряжение холостого хода $U_{\text{хх. инд}}$ получается при индуктивной нагрузке, а наименьшее $U_{\text{хх. емк}}$ — при емкостной. При активной нагрузке это напряжение $U_{\text{хх. акт}}$ имеет некоторое промежуточное значение.

Особенности внешних характеристик при различных нагрузках можно объяснить уравнением генераторного режима

$$\overline{U}_{\phi} = \overline{E}_{\phi} - \overline{I}_{\phi} \overline{Z}_{\phi}, \quad (152)$$

где E_{ϕ} — электродвижущая сила фазы статора;
 $Z_{\phi} = \sqrt{R_{\phi}^2 + X_{L\phi}^2}$ — полное внутреннее сопротивление фазы;
 R_{ϕ} и $X_{L\phi}$ — активное и индуктивное сопротивления фазы.

При активной нагрузке реакция статора сводится лишь к искажению поля ротора, поэтому величина электродвижущей силы генератора с изменением нагрузки не изменяется. Уменьшение напряжения на зажимах фазы статора с ростом нагрузки происходит только за счет внутреннего падения напряжения $I_{\phi} Z_{\phi}$ и при номинальной нагрузке не превышает 20—25%.

В случае индуктивной нагрузки реакция статора вызывает ослабление поля ротора, а следовательно, и уменьшение электродвижущей силы генератора с ростом нагрузки. Уменьшение электродвижущей силы и рост внутреннего падения

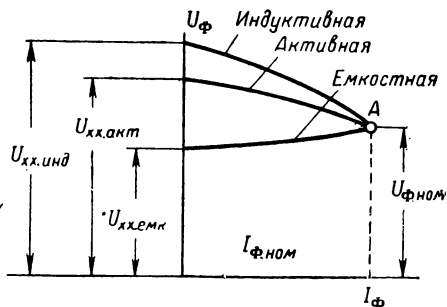


Рис. 310

напряжения при увеличении нагрузки вызывают более значительное понижение напряжения, чем при активной нагрузке (до 50 %).

При емкостной нагрузке реакция статора, наоборот, приводит к усилению поля ротора и к соответствующему увеличению электродвижущей силы генератора с увеличением нагрузки. В результате такого действия поля статора напряжение на зажимах генератора с увеличением нагрузки даже несколько увеличивается (до 10 %), так как электродвижущая сила под действием реакции статора возрастает больше, чем внутреннее падение напряжения в фазе статора.

§ 135. ГЕНЕРАТОР С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ ПРИ ПОМОЩИ ТВЕРДЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Наличие возбудителя у генератора переменного тока увеличивает их стоимость и усложняет уход за ними, поэтому научная мысль уже давно была направлена на то, чтобы освободить генераторы от возбудителя, а для возбуждения использовать остаточный магнетизм ротора. В конце 30-х годов советский инженер С. Б. Юдицкий впервые осуществил возбуждение трехфазного генератора без возбудителя с помощью твердых (селеновых) выпрямителей.

Одна из схем самовозбуждения генератора, предложенных С. Б. Юдицким, приведена на рис. 311. В схеме одновременно предусмотрена автоматическая стабилизация (постоянство) напряжения на зажимах генератора при переменной нагрузке, поэтому никакого регулировочного реостата в цепи возбуждения не требуется. Новыми элементами в схеме являются блок выпрямителей *В* и стабилизирующий трансформатор трехфазного тока *СТ*.

Трансформатор состоит из трех первичных и трех вторичных обмоток, сидящих на общем Ш-образном сердечнике. Первичные обмотки включаются в линейные провода, т. е. последовательно с приемниками, и работают лишь под нагрузкой. Вторичные обмотки соединяются с блоком выпрямителей, а также с зажимами генератора в точках *А*, *В* и *С*.

Назначение стабилизирующего трансформатора заключается в том, чтобы поддерживать автоматически постоянство напряжения на зажимах генератора при переменной нагрузке (вообще возбуждение генератора может осуществляться и без стабилизирующего трансформатора, но при этом не будет регулировки напряжения). Направление токов, проходящих через выпрямители, указано стрелками. Принцип действия выпрямителей основан на свойстве твердых полупроводников пропускать ток в одном направлении (гл. XVI).

Возбуждение генератора осуществляется следующим образом.

При вращении ротора в фазах статора возникают небольшие электродвижущие силы (2—3% номинальных) и, следовательно, на концы фаз *A*, *B* и *C*, к которым подключен блок выпрямителей, попеременно подаются то положительные, то отрицательные потенциалы (в течение полупериодов).

При положительных потенциалах ток через три правых выпрямителя (1, 2 и 3-й) поступает в роторную обмотку, а через три левых (4, 5 и 6-й) возвращается в генератор через ту (или те) из фаз, которая в это время находится под отрицательным потенциалом. Так, если в некоторый момент конец *A* первой фазы нахо-

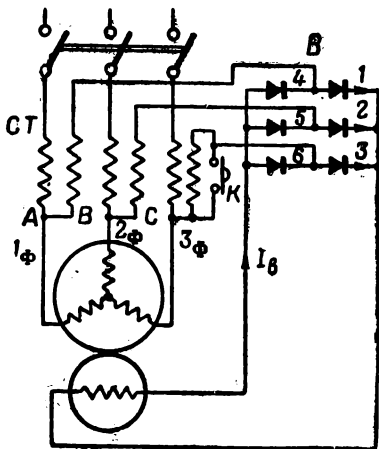


Рис. 311

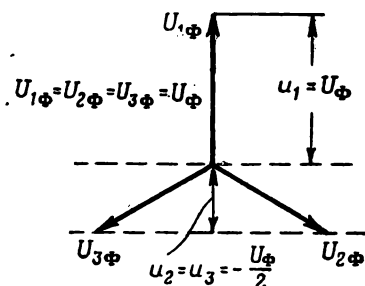


Рис. 312

дится под положительным потенциалом (рис. 312), то концы *B* и *C* соответственно второй и третьей фаз находятся под отрицательными потенциалами, поэтому ток поступает в роторную обмотку через первый выпрямитель и возвращается через пятый и шестой.

Проходя по обмотке возбуждения, ток подмагничивает ротор, отчего электродвижущие силы в фазах увеличиваются. В дальнейшем возбуждение происходит точно так же, как и в генераторах постоянного тока, т. е. до тех пор, пока в магнитной системе генератора не наступит магнитное насыщение.

При наличии стабилизирующего трансформатора электродвижущих сил, создаваемых остаточным магнетизмом, недостаточно для того, чтобы вызвать ток в выпрямителях, из-за сравнительно большого сопротивления вторичных обмоток трансформатора. Для уменьшения этого сопротивления (только в начале возбуждения) одна из вторичных обмоток шунтируется проводником малого сопротивления с помощью кнопки *K*. Кнопка отпускается, как только начнется возбуждение генератора.

Работа стабилизирующего трансформатора заключается в том, что с увеличением нагрузки токи, проходящие по пер-

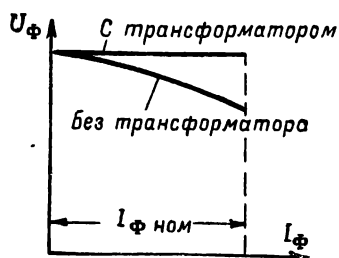


Рис. 313

шей силы генератора и таким образом автоматически поддерживают постоянство напряжения на зажимах генератора (рис. 313).

§ 136. МОЩНОСТЬ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРОВ. УХОД ЗА ГЕНЕРАТОРАМИ

Полезная мощность генератора трехфазного тока зависит от величины $\cos \varphi$ его приемников и при равномерной нагрузке определяется по известной уже формуле

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi,$$

где U и I — линейные значения напряжения и тока;

φ — угол сдвига фаз между фазовым током и фазовым напряжением.

Так как величина $\cos \varphi$ приемников обычно бывает неизвестна, то в таблице паспортных данных синхронных генераторов указывается полная, или кажущаяся, мощность в киловольтамперах:

$$P = \sqrt{3} UI \cdot 10^{-3}. \quad (153)$$

В синхронных генераторах, как и в генераторах постоянного тока, имеются потери в меди P_m , в железе $P_{ж}$ и потери механические $P_{мех}$, поэтому промышленный к. п. д. генераторов определяется формулой

$$\eta_{\%} = \frac{P}{P_{\text{под}}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} UI \cos \varphi}{\sqrt{3} UI \cos \varphi + \sum p} \cdot 100, \quad (154)$$

где

$P_{\text{под}}$ — мощность, подводимая к валу генератора со стороны первичного двигателя;

$\sum p = p_m + p_{ж} + p_{мех}$ — потери в генераторе.

Для генераторов разной мощности при номинальной нагрузке к. п. д. колеблется от 80 до 98 %. Синхронный турбогенератор мощностью в 100 000 ква, построенный заводом «Электросила», имеет водородное охлаждение, благодаря чему его к. п. д. доходит до 99 %.

Уход за синхронными генераторами значительно проще, чем за генераторами постоянного тока, и сводится в основном к уходу за подшипниками. Контактные кольца и щеточный механизм ротора особого ухода не требуют и работают безотказно. При эксплуатации генератора необходимо следить за состоянием изоляции обмоток и не допускать ее отсыревания.

Неисправностей в синхронных генераторах почти не бывает, если исключить редкие случаи пробоя изоляции. Неисправности в возбудителе такие же, как и у обычных генераторов постоянного тока.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ XII

1. В чем заключается принцип работы генератора трехфазного тока?
 2. Каково устройство трехфазных генераторов серии СГ?
 3. Как осуществляется возбуждение у генераторов?
 4. Что следует понимать под электродвижущей силой генератора и от чего зависит ее величина?
 5. Как сказывается реакция статора на величине напряжения у генератора при различных нагрузках?
 6. В чем заключается самовозбуждение генераторов с помощью твердых выпрямителей (какова электрическая схема генератора)?
-

ГЛАВА XIII

СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

§ 137. ОБРАТИМОСТЬ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И ПРИНЦИП РАБОТЫ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Синхронные генераторы, как и генераторы постоянного тока, обладают свойством обратимости, поэтому каждый синхронный генератор можно использовать как двигатель без изменения конструкции.

Известно, что при прохождении трехфазного тока через обмотки статора трехфазной машины в этом статоре создается вращающееся магнитное поле независимо от того, подводится ли ток в обмотки от постороннего источника (например, от другого генератора) или возникает в этих обмотках после замыкания внешней цепи, когда машина работает в качестве генератора. Число оборотов поля зависит от частоты тока, а также от количества пар полюсов, на которое выполнены ротор и обмотка статора:

$$n = \frac{60f}{p} \text{ об/мин.}$$

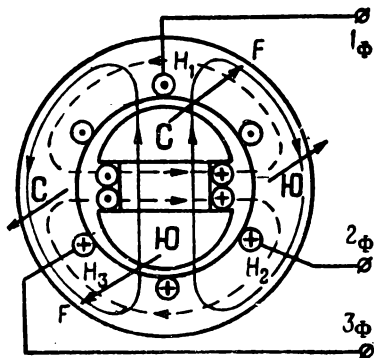


Рис. 314

Эти обороты для ротора генератора называются синхронными.

Представим себе, что ротор вращается механическим двигателем и совершает строго синхронное число оборотов (рис. 314). Если при этом в статор включить трехфазный ток от постороннего источника, а первичный двигатель отсоединить от генератора, то ротор будет продолжать вращаться с неизменным числом оборотов. Происходит это потому, что

в момент включения трехфазного тока в статор в нем создается вращающееся магнитное поле, которое взаимодействует с полюсами ротора (одноименные полюсы отталкиваются, а разноименные притягиваются) и таким образом поддерживает неизменным его вращение. Направление вращения поля всегда можно получить такое же, как и у ротора, если соблюдать определенное чередование фаз в статоре при подведении к нему трехфазного тока.

Строгое постоянство числа оборотов двигателя является одним из его положительных свойств, из-за которого двигатель называют синхронным (ротор вращается с такой же скоростью, что и магнитное поле статора). Таким образом, принцип действия синхронного двигателя основан на взаимодействии полюсов вращающегося магнитного поля статора и поля ротора.

§ 138. ПУСК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Работа синхронной машины в качестве двигателя происходит в соответствии с уравнением двигательного режима

$$\overline{U}_\phi = (-\overline{E}_{\phi.д}) + \overline{I}_\phi \overline{Z}_\phi, \quad (155)$$

где U_ϕ — напряжение, подводимое к зажимам одной фазы статора от постороннего источника тока;

$E_{\phi.д}$ — противоэлектродвижущая сила, наводимая в каждой фазе статора магнитным потоком ротора;

$I_\phi Z_\phi$ — полное внутреннее падение напряжения в фазе статора.

Для лучшего понимания свойств двигателя рассмотрим несколько подробнее порядок его пуска. Так, как указывалось в предыдущем параграфе, можно пускать только двигатели небольшой мощности. При пуске же мощных двигателей необходимо соблюдать следующие условия.

Перед подачей тока в статор (рис. 315, а) в роторной обмотке устанавливают такой ток возбуждения, чтобы возникающие в фазах статора электродвижущие силы $E_{\phi.д}$ были равны в любой момент времени напряжениям U_ϕ в соответствующих фазах постороннего источника тока, но имели противоположное направление (рис. 315, б).

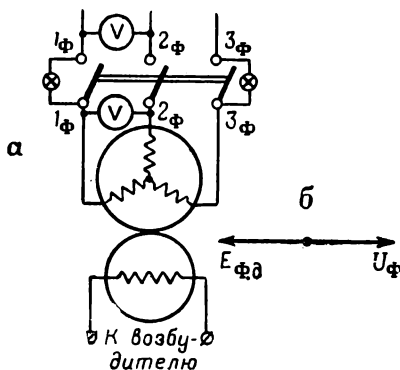


Рис. 315

О равенстве электродвижущих сил и напряжений судят по показаниям вольтметров, измеряющих линейные значения, а о направлениях этих величин — по электрическим лампам, соединяющим одноименные фазы источника и двигателя (рис. 315, а). При равенстве и противоположном направлении электродвижущих сил и напряжений в одноименных фазах ток в лампах отсутствует и они не светятся (электродвижущие силы и напряжения уравниваются друг друга).

В момент затухания ламп включают трехполюсный рубильник и отсоединяют вспомогательный двигатель, вращающий ротор. При этом ротор под действием собственных тормозящих усилий отстает от вращающегося поля на небольшой угол θ . Вследствие отставания ротора мгновенные значения напряжения источника тока уже не уравниваются мгновенными значениями противоэлектродвижущих сил в фазах статора, поэтому в фазы поступает трехфазный ток, который и создает в статоре вращающееся магнитное поле. Это поле в дальнейшем и обеспечивает синхронное вращение ротора.

Таким образом, пуск синхронного двигателя, в отличие от пуска других электрических двигателей (асинхронных или двигателей постоянного тока), связан с определенными трудностями (требует наличия вспомогательного двигателя, а также точного определения момента включения трехфазного тока в статор), и в этом, конечно, существенный недостаток синхронного двигателя. Как увидим дальше, трудности пуска в настоящее время устраняются благодаря небольшому изменению конструкции двигателя.

§ 139. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ И СВОЙСТВА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Угол θ , на который отстает ротор двигателя от вращающегося поля статора при пуске, определяет собой величину вращающего момента $M_{вр}$ в двигателе. Между вращающим моментом двигателя и углом θ (при неизменном токе возбуждения в обмотке ротора) существует зависимость

$$M_{вр} = c \sin \theta, \quad (156)$$

где c — некоторый постоянный коэффициент.

Из этой зависимости следует, что величина вращающего момента синхронного двигателя изменяется по закону синуса (рис. 316) и поэтому имеет максимальное значение $M_{макс}$ при $\theta = 90^\circ$.

При значениях тормозящего момента, превышающих максимальный момент, двигатель выпадает из синхронизма и быстро останавливается. У нормально выполненных синхронных двигателей перегрузочная способность $K = \frac{M_{макс}}{M_H}$ не превышает 2—2,5.

Выпадение синхронного двигателя из синхронизма при $M_{\text{торм}} > M_{\text{макс}}$ объясняется тем, что из-за увеличения угла $\theta > 90^\circ$ полюсы ротора настолько отстают от вращающегося поля статора, что проходят своей серединой мимо середины одноименных полюсов поля и в результате этого получают сильный толчок в сторону, противоположную направлению вращения (рис. 317).

При выпадении из синхронизма двигатель нужно немедленно отключить от питающего его источника. В противном случае статорные обмотки сильно перегреются (см. пуск

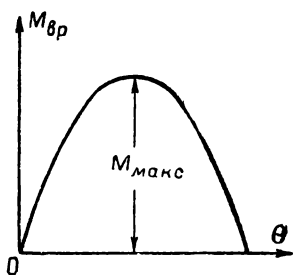


Рис. 316

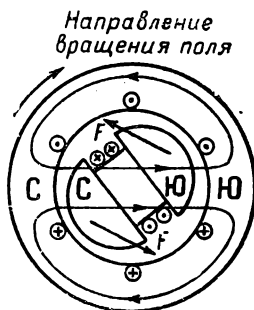


Рис. 317

асинхронного двигателя), а в роторной обмотке может возникнуть пробой изоляции под действием значительной по амплитуде переменной электродвижущей силы, которая будет наводиться полем статора в неподвижной обмотке ротора.

Рассмотрев физические процессы, происходящие в двигателе, можно сделать вывод, что синхронные двигатели обладают как положительными, так и отрицательными свойствами. Положительным свойством двигателей является строгое постоянство числа их оборотов при переменной нагрузке. К отрицательным свойствам двигателей относятся: 1) трудность пуска и реверсирования, 2) невысокая перегрузочная способность, 3) невозможность регулировки числа оборотов, 4) отсутствие вращающего момента при пуске.

Для устранения трудностей пуска синхронные двигатели в настоящее время снабжают дополнительной короткозамкнутой обмоткой на роторе и пускают сначала как асинхронные (при этом роторная обмотка возбуждения замыкается на небольшое сопротивление и также используется как короткозамкнутая обмотка). После разворота ротора в его обмотку включают постоянный ток от возбuditеля и ротор самостоятельно входит в синхронное вращение («догоняет» поле статора). Такой пуск синхронных двигателей называется асинхронным.

Короткозамкнутая обмотка, укладываемая в закрытые пазы полюсных наконечников ротора (рис. 318, а), представляет собой медные или алюминиевые стержни, соединенные с двух сторон дугообразными пластинами (рис. 318, б). Наличие короткозамкнутых обмоток у синхронного двигателя позволяет ему развивать некоторый пусковой момент, а также несколько повышает его перегрузочную способность.

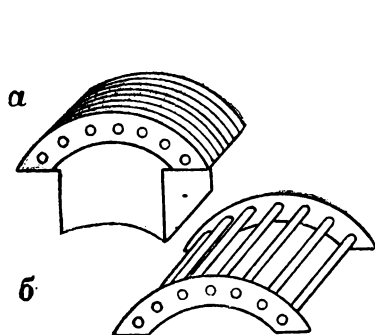


Рис. 318

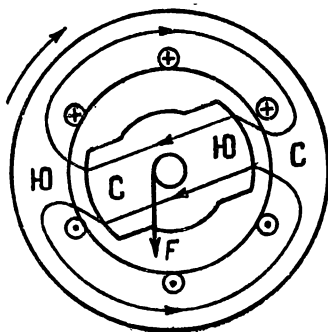


Рис. 319

§ 140. РЕАКТИВНЫЕ СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Реактивные двигатели отличаются от синхронных тем, что их роторы не имеют обмоток возбуждения. Вследствие этого максимальный вращающий момент у реактивных двигателей значительно меньше, чем у синхронных (при одинаковых размерах). Поэтому двигатели выполняют лишь на небольшие мощности (не более 0,5 кВт).

Ротор двигателей имеет явно выраженные полюсы из стали с высокой магнитной проницаемостью. Принцип работы двигателя заключается в том, что его ротор под действием поля статора намагничивается (рис. 319) и, взаимодействуя с разноименными полюсами этого поля, следует за ним синхронно.

Пускаются реактивные двигатели как обычные асинхронные благодаря возникающим вихревым токам в теле ротора при пересечении его вращающимся полем статора. После разворота ротор автоматически входит в синхронизм.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ XIII

1. На чем основан принцип работы синхронного трехфазного двигателя?
2. Каковы свойства синхронного двигателя?
3. Чем отличается реактивный синхронный двигатель от обычного синхронного двигателя?

ГЛАВА XIV

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

§ 141. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ ОДНОЯКОРНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Одноякорный преобразователь представляет собой обычный генератор постоянного тока с той лишь разницей, что у него наряду с коллектором имеются еще кольца со щетками на противоположной стороне вала якоря. Преобразователи бывают однофазные и трехфазные.

Если преобразователь вращать от постороннего двигателя, то он одновременно может давать постоянный (с коллектора) и переменный (с колец) ток. В этом случае машину называют генератором двойного тока.

Чтобы лучше понять работу однофазного преобразователя, рассмотрим, как получается переменная электродвижущая сила от генератора постоянного тока с помощью дополнительных колец и щеток. Для простоты возьмем кольцевой якорь, причем будем считать, что со стороны постоянного тока машина не имеет коллектора и щетки непосредственно касаются оголенных сторон витков обмотки якоря (рис. 320).

В одноякорном однофазном преобразователе имеются два кольца, припаянные к двум диаметрально противоположным точкам *C* и *D* якорной обмотки. Кольца, как и щетки *A* и *B*, в генераторе постоянного тока делят обмотку якоря на две параллельные ветви.

Однако эти ветви состоят из одних и тех же витков и вращаются вместе с кольцами при вращении якоря. Параллельные же ветви генератора постоянного тока не изменяют положения в пространстве (точки их стыка лежат на нейтральной линии), а состав витков в них

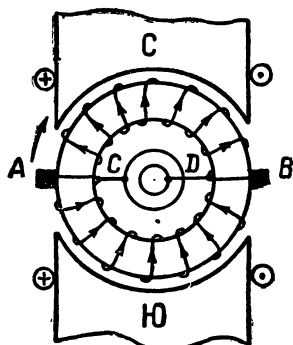


Рис. 320

все время изменяется при неизменном количестве вследствие равномерного наложения обмотки. Благодаря такой особенности параллельных ветвей, образуемых кольцами, с этих ветвей снимается переменная электродвижущая сила, изменяющаяся по закону синуса.

При горизонтальном расположении точек C и D , к которым припаяны кольца, параллельные ветви колец и щетки A и B совпадают. В этом положении якоря переменные электродвижущие силы в ветвях имеют максимальное значение E_m , равное электродвижущей силе E постоянного тока, поэтому можно написать: $E_m = E$.

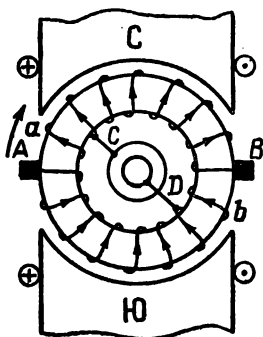


Рис. 321

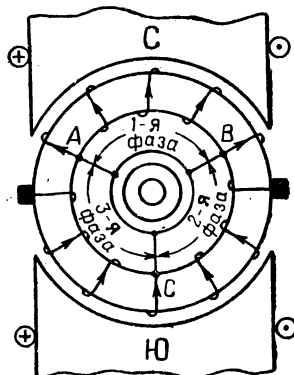


Рис. 322

При повороте якоря отдельные витки (например, витки a и b на рис. 321) параллельных ветвей колец переходят в зону другого полюса и в них электродвижущие силы изменяют направления на противоположные, вследствие чего максимальные электродвижущие силы в параллельных ветвях уменьшаются.

Когда точки C и D принимают вертикальное положение, переменные электродвижущие силы в параллельных ветвях становятся равными нулю, так как витки параллельных ветвей располагаются поровну под разноименными полюсами индуктора и в них возникают противоположно направленные электродвижущие силы, компенсирующие друг друга.

При дальнейшем повороте якоря в параллельных ветвях опять появляются электродвижущие силы, но уже другого знака (оттого что большая часть витков каждой ветви переходит в зону другого полюса). Максимального значения они достигают при горизонтальном положении точек C и D . В дальнейшем картина повторяется.

Так, без особых конструктивных изменений от машины постоянного тока можно получить переменный однофазный ток, подключая приемники к щеткам, касающимся колец.

Если же три точки якорной обмотки (точки A , B и C), от-

стоящие одна от другой на 120° (рис. 322), присоединить к трем кольцам, то от генератора постоянного тока можно получить трехфазный ток. В этом случае точки *A*, *B* и *C* разделяют обмотку якоря на три одинаковые части, или фазы, соединенные в треугольник.

В положении якоря, указанном на рис. 322, максимальная электродвижущая сила наводится в первой фазе, так как электродвижущие силы в витках имеют одинаковое направление и поэтому складываются. После поворота якоря на 90° электродвижущая сила в фазе становится равной нулю, так как витки поровну располагаются в зоне различных полюсов индуктора. В дальнейшем картина повторяется. То же самое справедливо и для двух других фаз, причем электродвижущие силы в них получаются сдвинутыми по фазе как между собой, так и по отношению к электродвижущей силе первой фазы на 120° .

Таким образом, одноякорный преобразователь представляет собой универсальную машину, в которой при одной обмотке имеются как бы две машины: со стороны коллектора — машина постоянного тока, а со стороны колец — машина переменного тока. Благодаря обратимости электрических машин преобразователь с любой стороны можно пускать двигателем (постоянного тока или синхронным) и соответственно с другой стороны получать переменное или постоянное напряжение. В этом и заключается работа одноякорного преобразователя.

На практике в специальных установках одноякорный преобразователь чаще всего используется для преобразования постоянного тока в переменный.

При работе преобразователя под нагрузкой, когда преобразованным напряжением питаются приемники, постоянный и переменный токи в якорной обмотке имеют противоположные направления, благодаря чему в обмотке фактически проходит разность токов, что уменьшает потери в преобразователе и повышает его к. п. д.

Противоположное направление токов объясняется тем, что переменный ток в якорной обмотке (в случае преобразования постоянного тока в переменный) создается противоэлектродвижущей силой, возникающей вследствие работы преобразователя двигателем, и имеет одинаковое с ней направление. Постоянный же ток, потребляемый преобразователем как двигателем, имеет обратное направление с противоэлектродвижущей силой.

§ 142. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ТОКАМИ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

Существенным недостатком одноякорных преобразователей является невозможность регулировки преобразованного ими напряжения способами, применяемыми в генераторах

постоянного и переменного токов. Объясняется это тем, что между подводимым к преобразователю и преобразованным напряжениями имеется жесткая зависимость, вследствие которой невозможно изменять преобразованное напряжение, не изменяя подводимого.

При рассмотрении работы одноякорного преобразователя было показано, что между электродвижущими силами постоянного и переменного токов в якорной обмотке существует зависимость

$$E_m = E,$$

где E_m — максимальное значение электродвижущей силы со стороны колец;

E — электродвижущая сила постоянного тока со стороны коллектора.

Для действующего значения переменной электродвижущей силы можно написать

$$E_{\text{пер}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}.$$

Но $E_m = E$, отсюда

$$E_{\text{пер}} = \frac{E}{\sqrt{2}}.$$

В случае преобразования постоянного напряжения U в переменное $U_{\text{пер}}$ преобразователь со стороны коллектора работает двигателем и подчиняется уравнению двигательного режима

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}},$$

где E — противоэлектродвижущая сила;

$I_{\text{я}} R_{\text{я}}$ — внутреннее падение напряжения в якорной обмотке.

Со стороны колец преобразователь работает источником и подчиняется уравнению генераторного режима

$$\bar{U}_{\text{пер}} = \bar{E}_{\text{пер}} - \bar{I}_{\text{я}} \bar{Z}_{\text{я}},$$

где $E_{\text{пер}}$ — действующее значение электродвижущей силы;

$I_{\text{я}} Z_{\text{я}}$ — внутреннее падение напряжения в якорной обмотке.

Если пренебречь внутренними падениями напряжения в обоих уравнениях, то они примут такой вид

$$U = E \text{ и } U_{\text{пер}} = E_{\text{пер}}.$$

Подставив в последнее равенство значение $E_{\text{пер}} = \frac{E}{\sqrt{2}}$, получим

$$U_{\text{пер}} = \frac{E}{\sqrt{2}}.$$

Но $E = U$, следовательно,

$$U_{\text{пер}} = \frac{U}{\sqrt{2}} = 0,707U. \quad (157)$$

Равенство показывает, что действующее значение преобразованного переменного напряжения меньше подводимого к преобразователю постоянного напряжения. Кроме того, равенство подтверждает, что между напряжениями существует жесткая зависимость.

Если попытаться изменять ток возбуждения в обмотке индуктора, то это приведет лишь к изменению числа оборотов преобразователя ($n = \frac{U - I_a R_a}{c\Phi}$), а следовательно, и к изменению частоты переменного напряжения, однако величина напряжения при этом не изменится (например, при уменьшении тока возбуждения уменьшится магнитный поток индуктора Φ , но зато соответственно увеличится частота f вследствие увеличения числа оборотов, поэтому действующее значение переменной электродвижущей силы $E_{\text{пер}} = 4,44fW\Phi$ останется без изменения).

В тех случаях, когда необходимо повысить или понизить переменное напряжение преобразователя, применяют трансформатор с соответствующим коэффициентом трансформации.

Для установления зависимости между токами в однофазном преобразователе пренебрегают потерями в нем (они меньше, чем в обычном генераторе) и считают, что мощность, потребляемая преобразователем от источника постоянного тока, т. е. $P = UI$, полностью переходит в полезную мощность, снимаемую с колец преобразователя:

$$P_{\text{пер}} = U_{\text{пер}} I_{\text{пер}} \cos \varphi, \quad (158)$$

где φ — угол сдвига фаз между током $I_{\text{пер}}$ и напряжением $U_{\text{пер}}$.

При таком допущении

$$P = P_{\text{пер}},$$

или

$$UI = U_{\text{пер}} I_{\text{пер}} \cos \varphi.$$

Для рационального использования преобразователя на практике величину $\cos \varphi$ приемников, питаемых преобразователем, делают обычно близкой к единице, поэтому последнее равенство принимает вид

$$UI = U_{\text{пер}} I_{\text{пер}},$$

откуда

$$I_{\text{пер}} = I \frac{U}{U_{\text{пер}}}.$$

Но $U_{\text{пер}} = \frac{U}{\sqrt{2}}$, тогда

$$I_{\text{пер}} = I \frac{U\sqrt{2}}{U},$$

или

$$I_{\text{пер}} = \sqrt{2}I. \quad (159)$$

На практике из-за потерь в преобразователе действующее значение переменного тока получается несколько меньше, чем то, которое получается из последнего равенства.

§ 143. РАЗНОВИДНОСТИ ОДНОЯКОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В настоящее время в некоторых специальных установках нередко применяется одноякорный преобразователь с двумя коллекторами, расположенными с обеих сторон вала, и с двумя кольцами, расположенными рядом с одним из коллекторов. Такой преобразователь отличается от обычного тем, что в пазах его якоря имеется еще одна самостоятельная обмотка, соединенная со вторым коллектором. Назначение обмотки и коллектора — преобразовывать напряжение постоянного тока.

Двухколлекторный преобразователь работает двигателем со стороны одного из коллекторов, причем ему подается сравнительно небольшое напряжение от аккумуляторной батареи. Со второго коллектора преобразователя снимается, как правило, повышенное напряжение постоянного тока (в зависимости от числа активных проводников в обмотке), а с колец, кроме того, и переменное напряжение.

Существуют одноякорные преобразователи исключительно для преобразования постоянного напряжения. У таких преобразователей колец нет, но имеются два коллектора и соответственно две самостоятельные обмотки с различным количеством активных проводников. Преобразователь работает в качестве двигателя со стороны коллектора низкого напряжения и на втором коллекторе дает повышенное постоянное напряжение.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ XIV

1. Каковы устройство и назначение одноякорного преобразователя?
 2. На чем основан принцип работы одноякорного преобразователя?
 3. Каково соотношение между напряжениями постоянного и переменного токов в одноякорном преобразователе?
 4. Каковы разновидности одноякорных преобразователей?
-

ГЛАВА XV

ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА

А. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ХИМИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ ТОКА

§ 144. ПРОВОДНИКИ ВТОРОГО РОДА И ИХ СВОЙСТВА

Для действия химических источников тока, т. е. гальванических элементов и аккумуляторов, обязательно требуются жидкие проводники. Поэтому, прежде чем рассматривать химические источники, необходимо ознакомиться со свойствами жидких проводников, а также с физическими процессами, которые вызываются в них постоянным электрическим током. Жидкие проводники иначе называются проводниками второго рода или электролитами.

На практике в качестве электролитов чаще всего применяются растворы кислот, щелочей и солей металлов в воде. Химически чистые кислоты, так же как и химически чистая вода, не проводят электрический ток и, следовательно, не являются электролитами.

От твердых проводников электролиты отличаются, во-первых, тем, что на них ток оказывает химическое действие, разлагая их на составные части, а во-вторых, тем, что сам ток в электролитах представляет собой двустороннее движение положительно и отрицательно заряженных частиц — ионов. Свободных электронов в электролитах нет. Явление разложения электролитов постоянным электрическим током на составные части называется электролизом.

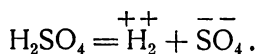
Впервые практически применил электролиз русский ученый, академик Б. С. Якоби в 1839 г. после открытия им гальванопластики — способа получения рельефных отпечатков с монет, медалей, печатей и т. п. гальваническим путем.

Открытие гальванопластики положило начало электрометаллургическому производству. В настоящее время электролиз широко используется в различных отраслях промышлен-

ности (при добыче и очистке металлов, при антикоррозионном покрытии деталей), а также в аккумуляторах, играющих большую роль в современной технике.

Основной электрической величиной, характеризующей электролиты, является их проводимость. Проводимость электролитов называется ионной. Она находится в прямо пропорциональной зависимости от количества содержащихся в электролитах ионов.

Образование ионов в электролитах происходит благодаря ослаблению внутренних (электрических) сил сцепления между атомами молекул того вещества, которое находится в растворителе. Так, например, молекула серной кислоты H_2SO_4 под действием воды (растворителя) распадается на два иона: положительно заряженный ион водорода H^{++} , который при распаде молекулы лишается двух своих электронов, и отрицательно заряженный ион кислотного остатка SO_4^{--} , который, наоборот, получает эти два лишних электрона. Математически процесс образования ионов из молекулы серной кислоты можно выразить так:



Подобный распад молекул растворяемого вещества, т. е. распад каждой молекулы только на два противоположно заряженных иона, происходит в любом электролите, причем положительно заряженным ионом всегда бывает либо атом металла, либо молекула водорода, так как они легко отдают свои электроны. Благодаря электрической нейтральности атомов, образующих молекулы, каждый электролит в целом также электрически нейтрален (как и твердый проводник при наличии в нем свободных электронов).

Не следует думать, что все молекулы растворяемого вещества распадаются в растворителе на ионы. Количество распавшихся молекул в электролитах зависит от концентрации электролита (т. е. от процентного содержания в нем растворяемого вещества) и от его температуры.

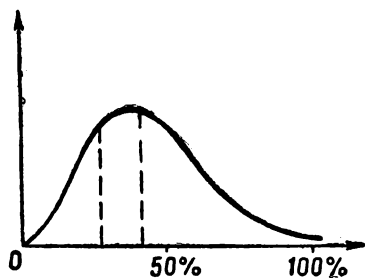


Рис. 323

Опыт показывает, что если изменять концентрацию любого электролита, то его проводимость будет изменяться так, как показано на рис. 323. А так как проводимость электролитов пропорциональна количеству ионов в них, то этот же график одновременно показывает, как изменяется количе-

ство ионов, а следовательно, и количество распавшихся молекул при изменении концентрации электролита.

Из рис. 323 видно также, что наибольшей проводимостью электролиты обладают при 30—40% концентрации. Это свойство электролитов используется в химических источниках тока для уменьшения их собственного сопротивления.

В отличие от твердых проводников, электролиты с увеличением температуры увеличивают проводимость. Объясняется это тем, что с повышением температуры электролита его молекулы начинают двигаться быстрее, поэтому при столкновениях друг с другом получают более сильные удары. В результате таких ударов некоторые молекулы распадаются на ионы (ионизация толчком), а это и ведет к повышению проводимости электролита.

§ 145. ЭЛЕКТРОЛИЗ ВОДЫ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОДОВ

Получение электрического тока в электролитах осуществляется по схеме, изображенной на рис. 324. Напряжение от источника тока подводится к электролиту по двум твердым проводникам *А* и *К*. Эти проводники, представляющие собой обычно металлические стержни или пластинки, называются электродами. Электрод, соединенный с положительно заряженным зажимом источника, называется **анодом**, а соединенный с отрицательно заряженным зажимом, — **катодом**.

Под действием источника тока электроды заряжаются и образуют между собой электрическое поле. Это поле и вызывает электрический ток в электролите в виде двустороннего движения имеющих в нем ионов (на рис. 324 ионы условно изображены кружочками с соответствующими знаками). Положительно заряженные ионы называют **катионами**, так как при наличии тока в электролите они движутся к катоду; отрицательно заряженные ионы называют **анионами** (движутся к аноду).

Физические процессы, связанные с электролизом, в различных электролитах протекают по-разному. Рассмотрим в качестве примера электролиз воды, который возникает при прохождении постоянного тока через слабый раствор серной кислоты в воде.

В таком электролите имеются ионы двух типов: H^+ и SO_4^{--} (рис. 325). Количество их определяется температурой и концентрацией электролита. Во избежание побочных химических реакций (окисления) электроды изготавливаются из платины в виде небольших тонких пластинок.

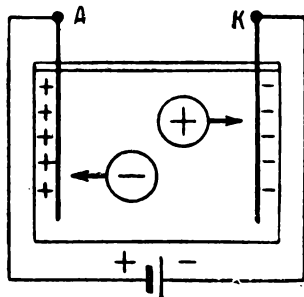


Рис. 324

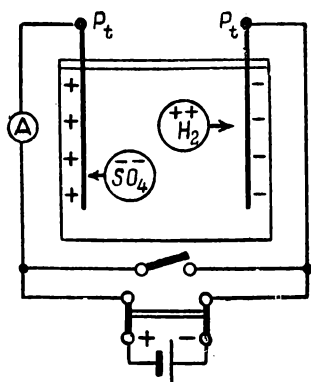


Рис. 325

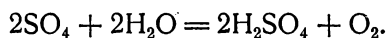
При включении двухполюсного рубильника ионы электролита начинают упорядоченное движение в противоположные стороны, т. е. по направлению к электродам. Процессы, которые при этом возникают у электродов, заключаются в следующем.

К катоду подходят положительно заряженные водородные ионы H_2^+ . Здесь они получают от катода по два недостающих электрона и превращаются в нейтральные молекулы водорода H_2 . Эти молекулы сначала тонким слоем покрывают катод, а затем в виде

газа водорода выходят из электролита. Процесс, происходящий у катода, кратко можно записать так:

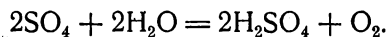


В то же самое время к аноду подходят ионы кислотного остатка SO_4^- . Анод отнимает у ионов электроны и превращает их в электрически нейтральные частицы SO_4 . Однако химическое соединение SO_4 нестойкое и в природе в свободном виде не встречается, поэтому сразу же после нейтрализации частицы SO_4 вступают в химическую реакцию с водой по формуле



Возникающие в результате реакции молекулы серной кислоты опять растворяются в воде, а молекулы кислорода сначала тонкой пленкой покрывают анод, а затем в виде газа выходят из электролита.

Процессы, происходящие у анода, можно записать так:



Таким образом, благодаря возникающей побочной реакции у анода электрический ток фактически разлагает не серную кислоту, а воду на водород и кислород. Подобные химические реакции, возникающие при любом электролизе, называются вторичными химическими реакциями.

Если прекратить прохождение электрического тока, для чего выключить двухполюсный рубильник, а вместо него включить однополюсный (рис. 325) и этим соединить между

собой электроды, то амперметр укажет на наличие тока в цепи, причем этот ток будет обратного направления по сравнению с тем током, который шел через электролит от источника.

Появление электрического тока в цепи свидетельствует о том, что сам прибор (т. е. сосуд с электролитом и электродами) в результате электролиза превращается в источник тока. Происходит это потому, что однородные платиновые электроды при электролизе покрываются различными веществами (кислородом и водородом), становясь как бы разнородными по отношению к электролиту. Из практики же известно, что два разнородных электрода, опущенных в электролит, всегда образуют химический источник тока, называемый гальваническим элементом.

Превращение однородных электродов в разнородные в результате электролиза называется поляризацией электродов при электролизе. Поляризация электродов, как узнаем дальше, лежит в основе принципа действия всех существующих электрических аккумуляторов.

Б. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ МАРГАНЦЕВО-ЦИНКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

§ 146. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

При объяснении работы гальванических элементов теория исходит из следующих двух положений.

Первое положение: все металлы и водород обладают способностью растворяться в электролитах в виде положительно заряженных ионов. Эту способность металлов и водорода называют электролитической упругостью растворения. У различных металлов электролитическая упругость растворения разная и зависит от их внутренней структуры.

Второе положение: все электролиты обладают способностью проникать (очень близко) своими положительно заряженными ионами к поверхностным атомам электродов. Эту способность электролитов называют осмотическим давлением. У различных электролитов осмотическое давление разное и определяется структурой находящихся в них катионов.

На основании этих двух положений можно утверждать, что если поместить в какой-либо электролит металлический или водородный электрод, то его электролитическая упругость растворения может оказаться либо больше осмотического давления электролита, либо меньше его, либо, наконец, равной ему.

В первом случае ионы металла или водорода входят в электролит и заряжают его положительно, сам электрод при этом остается заряженным отрицательно (за счет остающихся в нём электронов, теряемых ионами). В результате между электродом и электролитом устанавливается некоторая разность потенциалов (следует заметить, что выходу ионов в электролит препятствуют электрические силы притяжения их электронами, оставшимися в электроде, поэтому общее количество ионов, поступающих в электролит, получается крайне незначительным).

Во втором случае, наоборот, ионы электролита проникают через растворитель к поверхностным атомам электрода и заряжают его положительно, сам электролит при этом заряжается отрицательно (за счет излишних анионов). В результате между электродом и электролитом опять устанавливается некоторая разность потенциалов.

Наконец, в третьем случае электролитическая упругость растворения металла (или водорода) уравнивается осмотическим давлением электролита, поэтому электрод и электролит остаются электрически нейтральными и разность потенциалов между ними равна нулю.

Возникающая между электродом и электролитом разность потенциалов в первых двух случаях не может быть использована для получения электрического тока при наличии только одного электрода. Действительно, чтобы получить электрический ток, необходимо создать замкнутую электрическую цепь, т. е. соединить проводником электрод с электролитом.

Однако, если проводник при этом будет взят из такого же металла, что и электрод, то он зарядится до одинакового с ним потенциала, поэтому разность потенциалов между проводником и электродом станет равной нулю. Очевидно, для получения тока в электролит нужно опустить еще один электрод и обязательно из другого металла (с другой электролитической упругостью растворения). Только в этом случае разность потенциалов между обоими электродами будет отличной от нуля.

Таким образом, для получения гальванического элемента в электролит необходимо опустить два разнородных электрода. Ввиду того что разность потенциалов невозможно измерить между электролитом и отдельным электродом, условились потенциалы всех металлов измерять не относительно потенциала электролита, а относительно потенциала водородного электрода, принимая этот потенциал условно равным нулю. Водородный электрод получают путем насыщения губчатого (т. е. пористого) платинового электрода водородом.

Для измерения потенциалов электрод из испытуемого металла соединяют в гальванический элемент с водородным

электродом и вольтметром измеряют разность потенциалов на зажимах элемента.

Знак потенциала устанавливают по направлению тока в вольтметре. Если ток направлен от испытуемого электрода к водородному, то потенциал металла считают положительным, а при обратном направлении тока — отрицательным. Измеренные таким образом потенциалы для некоторых металлов приведены в табл. 19.

Таблица 19

Потенциалы некоторых металлов

Ртуть	+0,86 в
Серебро	+0,8 "
Медь	+0,34 "
Водород	0,00 "
Свинец	—0,12 "
Никель	—0,22 "
Кадмий	—0,40 "
Железо	—0,43 "
Цинк	—0,76 "
Алюминий	—1,28 "

По этой таблице можно определить разность потенциалов (или электродвижущую силу), которую может дать гальванический элемент, составленный из двух любых металлов. Так, если взять элемент из медного и цинкового электродов, то разность потенциалов на его зажимах будет

$$E = U_{\text{Cu}} - U_{\text{Zn}} = 0,34 - (-0,76) = 1,1 \text{ в.}$$

Пользуясь основными положениями теории гальванических элементов, рассмотрим работу медно-цинкового элемента, электролитом которого служит раствор серной кислоты в воде.

Электролитическая упругость растворения цинка больше, чем осмотическое давление электролита, поэтому ионы цинка входят в электролит (рис. 326) и заряжают цинковый электрод отрицательно. Эти же ионы оттесняют (силами отталкивания) водородные ионы электролита к медному электроду. Электролитическая упругость растворения меди меньше, чем осмотическое давление электролита, благодаря этому ионы водорода проникают к поверхностным атомам медного электрода и заряжают его положительно.

Так в гальваническом элементе

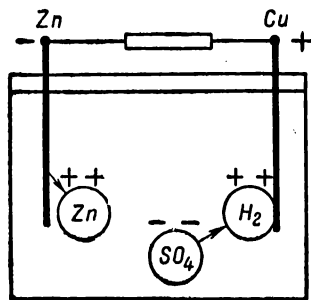


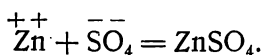
Рис. 326

осуществляется разделение электрических зарядов и, следовательно, создается электрическое поле между его зажимами за счет собственной химической энергии цинкового электрода и электролита.

Внешние силы, о которых мы говорили, рассматривая электризацию тел (§ 3), в данном случае проявляются в виде электролитической упругости растворения цинка и осмотического давления электролита. Благодаря этим двум явлениям и осуществляется разделение электрических зарядов в химических источниках тока.

Если включить элемент на внешнюю цепь, то электроны из цинкового электрода станут переходить в медный и нейтрализовать на нем водородные ионы. В результате нейтрализации образуются молекулы водорода, которые сначала тонким слоем покрывают медный электрод, а затем выходят из электролита в виде газа водорода. Медный электрод, покрытый пленкой водорода, превращается как бы в водородный электрод с потенциалом, равным нулю (табл. 19), вследствие чего разность потенциалов на зажимах элемента после его непродолжительной работы снижается до 0,7 в. Это нежелательное явление в элементах носит название поляризации электродов (не путать с явлением поляризации электродов при электролизе). Для устранения поляризации применяют химические деполяризаторы — вещества, богатые кислородом. Соединяясь с водородом, кислород образует воду и этим самым исключает образование пленки на электроде.

В то время как на медном электроде происходит нейтрализация водородных ионов, у цинкового электрода ионы цинка соединяются с кислотным остатком и образуют цинковый купорос,

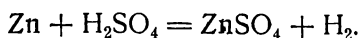


До включения внешней цепи этого процесса не происходит, так как ионы цинка притягиваются к цинковому электроду находящимися в нем электронами.

Цинковый купорос либо оседает на электроде, либо выпадает на дно сосуда. На смену ионам цинка, израсходованным на образование цинкового купороса, из электрода выходят новые ионы, которые в свою очередь образуют цинковый купорос. Этот процесс происходит до тех пор (при замкнутой внешней цепи), пока весь цинк электрода не превратится в цинковый купорос. У медного электрода при этом непрерывно выделяется водород.

Таковы физические процессы, происходящие при работе медно-цинкового элемента. Эти процессы позволяют сделать два вывода:

1. Принцип работы гальванических элементов основан на превращении химической энергии участвующих в нем веществ в электрическую. При работе элемента фактически происходит реакция замещения по формуле



2. Продолжительность работы элемента определяется массой (весом) его активного электрода, т. е. электрода, который растворяется в электролите (в данном случае цинковый электрод).

Таким образом, в отличие от электрических генераторов, которые работают за счет подводимой к ним извне энергии, гальванические элементы работают за счет собственной химической энергии. Благодаря этой особенности гальванических элементов и вообще химических источников тока их характеризуют не мощностью, а емкостью.

Емкостью элемента называется количество электричества, которое проходит через поперечное сечение электрической цепи за все время его работы. Емкость элемента можно подсчитать по формуле

$$Q = I_p t_p \text{ ампер-часов,} \quad (160)$$

где I_p — разрядный ток в цепи элемента в амперах;

t_p — продолжительность разряда в часах.

Емкость гальванических элементов пропорциональна массе их активного электрода.

§ 147. УСТРОЙСТВО МАРГАНЦЕВО-ЦИНКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИХ

Устройство

Из большого количества элементов, известных на практике, в настоящее время широко применяются марганцево-цинковые элементы. От других элементов они отличаются главным образом удобством своей конструкции; благодаря которой облегчается их эксплуатация в различных условиях. В Советской Армии эти элементы применяются в основном в полевой телефонии.

По устройству марганцево-цинковые элементы бывают сухие и водоналивные. Оба типа элементов конструктивно различаются незначительно.

В сухом элементе имеется готовый электролит, загущенный крахмалом или мукой до состояния пасты (чтобы не выливался из сосуда).

У водоналивного элемента электролита нет, а имеется лишь порошкообразный хлористый аммоний, который при

растворении в воде образует электролит для марганцево-цинковых элементов. Для получения электролита в элемент необходимо налить воды, отчего он и получил свое название.

На рис. 327 изображен водоналивной элемент в разрезе. Главными частями элемента являются два электрода, сосуд и электролит.

У элементов данной системы сосуд 1, выполненный в виде цинковой коробки круглого или прямоугольного сечения, служит одновременно отрицательным электродом. Для соединения с внешней цепью к цинковой коробке припаян короткий изолированный проводничок 2.

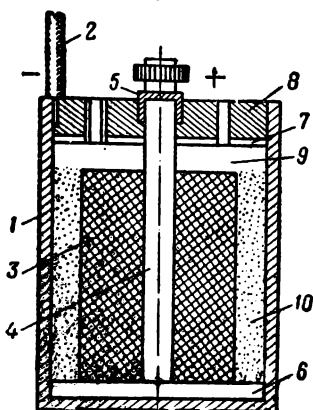


Рис. 327

В качестве положительного электрода используется механическая порошкообразная смесь из двуокиси марганца MnO_2 , графита (для улучшения проводимости смеси) и сажи (для лучшего пропитывания смеси электролитом). Такую смесь (агломерат) увлажняют электролитом, а затем прессуют из нее положительный электрод 3, в который для большей прочности вставляют центральный угольный стержень 4. На верхний конец стержня насаживают латунный колпачок 5 с припаянным к нему зажимом для включения элемента в цепь. Чтобы электрод не выкрашивался, его обертывают хлопчатобумажной тканью и обвязывают нитками.

Располагают электрод в центре цинкового сосуда и изолируют от него картонной прокладкой 6. В верхней части электрод центрируют картонной шайбой 7, которая одновременно является и основанием для слоя смолы 8. Этот слой надежно скрепляет положительный электрод с сосудом и предохраняет электролит от высыхания. Для выхода газов при работе элемента (частично выделяется водород), а также для заливки элемента водой в смоляной слой вставлены две стеклянные трубки разного диаметра (трубка с большим диаметром для заливки воды).

Между центрирующей шайбой и спрессованной частью положительного электрода имеется небольшое свободное пространство 9, называемое газовой камерой. Камера служит для понижения давления газов, образующихся в элементе при его работе. Все остальное свободное пространство 10 между положительным электродом и стенками сосуда заполнено

гигроскопическими веществами (древесные опилки, промокальная бумага и т. п.). В газовую камеру помещается в нужном количестве хлористый аммоний.

Наружная поверхность сосуда покрывается изолирующим влагостойким составом, чтобы предупредить вытекание электролита в случае преждевременного проедания цинка при работе элемента. Для защиты наружной поверхности сосуда от механических повреждений элемент заключается в картонный футляр, пропитанный изолирующим и влагостойким составом.

Сухой элемент отличается от водоналивного только тем, что у него нет водоналивного отверстия (трубки) и пространство между положительным электродом и сосудом занимает загущенный электролит.

В зависимости от состава электролита сухие элементы подразделяются на летние, холодостойкие и универсальные.

Обычный загущенный электролит при температуре -22°C замерзает и отказывает в работе. Разработаны новые электролиты, при которых элементы могут работать в интервале температур от -50 до $+60^{\circ}\text{C}$.

Летний элемент — это элемент с обычным электролитом для работы при температурах от -20 до $+60^{\circ}\text{C}$.

Холодостойкий элемент имеет специальный электролит и предназначается для работы при температурах от -40 до $+40^{\circ}\text{C}$.

Наконец, универсальный элемент также имеет специальный электролит и может работать при температурах от -50 до $+60^{\circ}\text{C}$.

Марганцево-цинковые элементы рассмотренного нами устройства изготавливаются шести габаритных номеров. Каждому номеру соответствуют определенные стандартные размеры элемента. Чем выше номер элемента, тем больше его размеры.

Более совершенным сухим элементом, имеющим меньшие размеры, является элемент в форме галеты. Устройство элемента показано на рис. 328.

Элемент состоит из положительного электрода, спрессованного из агломератной смеси в виде четырехугольного брикета 1, такой же формы картонной диафрагмы 2, пропитанной электролитом, и отрицательного электрода — четырехугольной цинковой пластинки 3. Все части элемента наложены одна на другую, как показано на рис. 328, и заключены

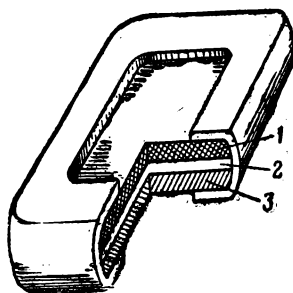


Рис. 328

в хлорвиниловую оболочку. Оболочка изолирует элемент с боков и не дает возможности вытекать электролиту.

Элементы галетной конструкции применяются в сухих гальванических батареях. Батареей называется группа элементов, соединенных для совместной работы. В сухих батареях, выпускаемых нашей промышленностью, гальванические элементы соединяют последовательно (плюс первого с минусом второго и т. д.), чтобы получить более высокое напряжение. Для этого элементы накладывают друг на друга так, чтобы положительный электрод одного элемента касался отрицательного электрода другого. Для лучшего контакта с положительным электродом на цинковый электрод наносят тонкий слой (толщиной 0,5 мм) порошкообразного графита.

Столбик из нескольких элементов слегка сжимают под прессом, после чего к крайним элементам прикладывают цинковые пластинки с припаянными к ним изолированными проводами (выводами) и стягивают нитками. Затем столбики помещают в картонный футляр и соединяют между собой последовательно; общие зажимы от батареи выводят наружу. Крышку футляра наглухо заклеивают.

Батареи из элементов, имеющих форму галеты, занимают значительно меньший объем, чем батареи из элементов цилиндрической формы.

Физические процессы

Независимо от конструкции марганцево-цинковых элементов физические процессы, протекающие при их работе, заключаются в следующем.

Молекулы хлористого аммония при растворении его в воде образуют положительно заряженные ионы аммония NH_4^+ и отрицательно заряженные ионы хлора Cl^- (рис. 329). Благодаря большой электролитической упругости растворения цинка его ионы входят в электролит и заряжают цинковый электрод отрицательно.

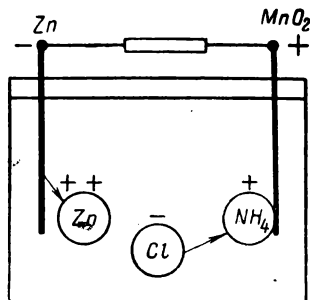


Рис. 329

Двуокись марганца не является металлом и не обладает электролитической упругостью растворения, поэтому к поверхностным атомам электрода проникают положительно заряженные ионы аммония и заряжают его положительно.

После включения внешней цепи электроны перемещаются к положительному электроду и нейтрализуют

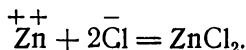
о окружающие его ионы аммония. Процесс у электрода можно записать так:



После нейтрализации молекулы аммония вступают в химическую реакцию с двуокисью марганца:



Одновременно у отрицательного электрода ионы цинка соединяются с ионами хлора и образуют хлористый цинк:



Такие процессы у электродов идут непрерывно (при замкнутой внешней цепи), пока цинк полностью не перейдет в хлористый цинк.

Важно отметить, что благодаря наличию в элементе двуокиси марганца освобождающиеся молекулы водорода не покрывают положительный электрод пленкой и не поляризуют его, а соединяются с кислородом и образуют воду. В этом преимущество марганцево-цинковых элементов перед элементами медно-цинковой системы.

§ 148. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТОВ

Электрические данные

К электрическим данным элементов относятся электродвижущая сила, внутреннее сопротивление, разрядное напряжение и емкость.

Электродвижущая сила E элементов определяется веществом электродов и в среднем равна 1,5 в. Небольшие отклонения от этого среднего значения у отдельных элементов объясняются качеством компонентов, входящих в состав агломератной смеси положительного электрода. От размеров элемента электродвижущая сила не зависит, поэтому у всех элементов одинакова.

Внутреннее сопротивление R_0 элемента состоит из сопротивления электролита и сопротивления электродов. Величина внутреннего сопротивления обратно пропорциональна размерам элемента. Объясняется это тем, что с увеличением размеров элемента увеличивается площадь соприкосновения электролита с каждым из электродов, а эта площадь является фактически площадью поперечного сечения проводящего слоя электролита.

По сравнению с другими источниками у гальванических элементов внутреннее сопротивление довольно большое — от 0,5 до 5 ом.

Величина разрядного напряжения на зажимах элемента определяется уравнением генераторного режима

$$U_p = E - I_p R_0$$

и зависит от разрядного тока I_p , а также от внутреннего сопротивления элемента. При расчетах гальванических элементов сопротивление внешней цепи принимают равным 10 ом, поэтому номинальный ток для каждого элемента имеет вполне определенную величину.

Если любой гальванический элемент включить на непрерывный разряд через десятиомное сопротивление и при этом записывать показания вольтметра, то можно построить раз-

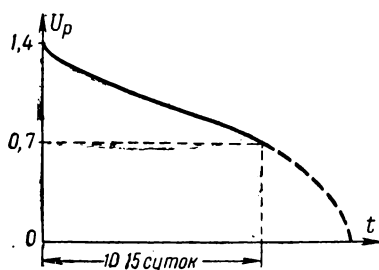


Рис. 330

рядную кривую, т. е. кривую зависимости разрядного напряжения на зажимах элемента от времени. Примерный вид такой кривой показан на рис. 330. Из рисунка видно, что в начале разряда напряжение у элемента наибольшее (около 1,4 в), а затем постепенно падает и в конце разряда доходит до 0,7 в. Ниже гальванические элементы не разряжаются

(становятся негодными), так как напряжение менее 0,7 в недостаточно для приемников, которые питаются от гальванических элементов.

Разрядное напряжение в 0,7 в называется поэтому конечным разрядным напряжением гальванических элементов. Наибольшее разрядное напряжение у элементов в начале разряда называется начальным разрядным напряжением. Оно зависит от размеров элемента (табл. 20). Непрерывное понижение напряжения у элемента при разряде объясняется ростом его внутреннего сопротивления.

Емкость марганцево-цинковых элементов пропорциональна массе любого из электродов, так как в создании тока у элементов данной системы участвуют оба электрода. Благодаря такой зависимости емкость с увеличением размеров элемента также увеличивается (табл. 20).

Необходимо иметь в виду, что гарантируемую заводом емкость элемент может отдать лишь при разряде на десятиомное сопротивление при температуре электролита 20° С. При уменьшении сопротивления во внешней цепи разрядный ток у элемента увеличивается, а емкость, наоборот, уменьшается. Объясняется это тем, что при повышенных токах химические реакции у электродов протекают очень интенсивно, в результате чего вещество электродов используется не полностью

(поверхность цинкового электрода местами покрывается хлористым цинком и в дальнейшем не участвует в работе).

При понижении температуры электролита возрастает его сопротивление, поэтому конечное разрядное напряжение элемента наступает раньше, чем при нормальной температуре в 20°C ($U_p = E - I_p R_0$). А раз продолжительность разряда становится короче, то емкость элемента, как это следует из формулы $Q = I_p t_p$, уменьшается.

Свойства элементов

Свойства сухих и водоналивных элементов противоположны друг другу.

Сухие элементы выходят с завода с электролитом, поэтому всегда готовы к действию, и в этом их большая ценность. Однако они подвержены саморазряду, в результате чего сравнительно быстро снижают свою емкость и выходят из строя.

Саморазряд — это внутренний разряд элемента, который протекает независимо от того, включена или выключена внешняя цепь элемента. Объясняется саморазряд в основном неоднородностью цинкового электрода, наличием в нем примесей других металлов в виде равномерных вкраплений. Вследствие наличия примесей на цинковом электроде образуется множество короткозамкнутых микроскопических элементов, которые непрерывно разрушают его, превращая в хлористый цинк. Из-за саморазряда сухие элементы не выдерживают длительного хранения (более 18 месяцев), и в этом их существенный недостаток.

Новые водоналивные элементы не имеют электролита, поэтому саморазряд в них отсутствует. При соблюдении правил хранения эти элементы можно хранить до трех лет (практически пока в элемент не попадет влага и не вызовет в нем саморазряда). Существенный недостаток водоналивных элементов состоит в том, что они не сразу готовы к действию. Для приведения их в рабочее состояние требуется 10—12 час. (за это время растворяется хлористый аммоний и пропитывается агломератная смесь). Одновременно с приведением элементов в действие у них начинается и саморазряд.

Маркировка элементов и батарей

Для элементов и батарей установлена определенная маркировка, т. е. система условных обозначений, позволяющих определять основные данные этих источников тока.

В 1958 году в маркировку внесены некоторые изменения в целях более полной характеристики источников.

По новой маркировке цифры и буквы обозначают:

1. Первые цифры — начальное напряжение источника.

2. Последние цифры — емкость свежизготовленных элементов или батарей.

3. Первая буква (или сочетание двух — трех букв) — назначение источника тока. Например: П — приборный, Ф — фонарный, А — анодный, Н — накальный и др.

4. Буквы МЦ — элемент марганцево-цинковой системы.

5. Буква Г — элемент галетной конструкции.

6. Буквы У или Х — соответственно универсальный или холодостойкий элемент; отсутствие этих букв в маркировке означает, что элемент летний.

Примеры маркировки:

1. Элемент — 1,48-ПМЦ-9.

2. Батарея — 102-АМЦ-у-1,0.

По старой маркировке в условном обозначении элемента первая цифра обозначала габаритный номер элемента, буква С или В — тип элемента (сухой или водоналивной), буквы Л, Х или У (для сухих элементов) — тип элемента по электролиту (летний, холодостойкий, универсальный), последняя цифра — емкость элемента.

Так маркировка 3С-х-30 обозначала: элемент третьего габаритного размера, сухой, холодостойкий с емкостью в 30 а-ч.

Маркировка БАС-г-80-л-2,1 обозначала: батарея анодная, сухая из элементов галетной конструкции, напряжение батареи 80 в, элементы летние, емкость батареи 2,1 а-ч.

Таблица 20

Основные электрические данные элементов и батарей

Условное обозначение (маркировка)		Начальные характеристики			Характеристики в конце срока хранения			Размеры, мм			Вес, кг
новое	старое	напряжение, в	емкость, а-ч	продолжительность работы, ч	сохранность, месяцы	емкость	продолжительность работы, ч	длина	ширина	высота	
1,48-ПМЦ-9	2-с-л-9	1,48	9,0	80	12	6,0	60	42	42	102	0,3
1,6-ПМЦ-у-8	2-с-у-8	1,4	8,0	80	12	—	—	42	42	102	0,3
1,6-ФМЦ-у-3,2	1-кс-у-3,2	1,4	3,2	32	12	2,6	26	—	∅ 34	64	0,105
102-АМЦ-у-1,0	БАС-80-у-1,0	102	1,0	95	15	0,75	68	218	138	73	3,0
160-АМЦГ-0,35	БАС-Г-160-0,35	160	0,35	—	6	0,24	—	109	77	144	1,8

Условные обозначения элементов и батарей наносятся на стенки их картонных футляров (у батарей — на крышку футляра). Для сухих элементов, кроме того, указывается их дата выпуска и сохранность, т. е. продолжительность времени в месяцах, в течение которого элементы снижают свои электрические данные не более установленных норм. Для водоналивных элементов дается также краткая инструкция по их эксплуатации.

Наиболее важные в практическом отношении электрические данные для некоторых элементов и батарей приведены в табл. 20.

§ 149. ЭКСПЛУАТАЦИЯ И ХРАНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Заряд водоналивных элементов

Заливка воды в водоналивные элементы и перевод их благодаря этому в действующее состояние называется зарядом элементов. Для заряда можно применять питьевую, а также дождевую или снеговую воду, лишь бы она была чистой. Воду заливают в водоналивное отверстие малыми порциями, по мере ее впитывания гигроскопическими веществами и агломератной смесью элемента. Если вода плохо впитывается, то нужно проволокой прочистить газовую трубку, затем, наклонив элемент, слегка постучать им по столу и, наконец, прочистить спичкой или проволокой водоналивную трубку.

После заливки элемент оставляют в покое на 6 час. Количество воды, необходимое для заливки, указывается на этикетке футляра, но практически воду вливают до тех пор, пока она не перестанет впитываться элементом. Через 6 час. заливку воды в элемент повторяют (до тех пор, пока она не перестанет впитываться) и опять оставляют его на 6 час. После этого элемент переворачивают вверх дном, сливают лишнюю воду (может остаться в газовой камере) и закрывают пробкой водоналивное отверстие. Элемент насухо протирают тряпкой. В таком виде элемент может быть выдан для эксплуатации.

Хранение элементов

Основными условиями, которые необходимо соблюдать при хранении элементов, являются определенные значения температуры и влажности воздуха.

Для незаряженных водоналивных элементов главную опасность представляет их отсыревание, поэтому элементы этого типа необходимо хранить в сухих отапливаемых (зимой) помещениях с температурой не ниже 18° С. При хранении элементов обе трубки должны быть плотно закрыты пробками.

Сухие и заряженные водоналивные элементы следует хра-

нить при более низких температурах, чтобы уменьшить саморазряд (высокие температуры ускоряют саморазряд). Поэтому помещения для хранения таких элементов зимой не должны отапливаться, а летом должны иметь хорошую вентиляцию. При длительном хранении элементы держат в специальных холодильниках.

Эксплуатация элементов

При эксплуатации элементов в первую очередь необходимо расходовать сухие элементы более ранних выпусков с учетом температурных условий их работы (брать элементы с соответствующим электролитом).

В зимнее время элементы по возможности следует утеплять для получения от них полной емкости.

§ 150. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Источники электрического тока, как и приемники, могут соединяться между собой последовательно, параллельно и смешанно. Так, генераторы мощных электрических станций соединяются только параллельно для увеличения мощности станций. Химические источники тока соединяются для совместной работы в батареях чаще всего последовательно, реже смешанно. Параллельное соединение таких источников на практике не применяется ввиду незначительной величины напряжения, которое получается при этом соединении.

Рассмотрим все три способа соединения гальванических элементов и ознакомимся с особенностями каждого из них. Заметим, что все сказанное будет справедливо и для аккумуляторов.

Элементы, соединяемые в батареи, должны иметь одинаковую емкость и электродвижущую силу. Все электрические величины (электродвижущую силу, напряжение, ток, емкость и внутреннее сопротивление), характеризующие батарею, условимся обозначать общепринятыми буквами без индексов, а для отдельного элемента эти же величины обозначать теми же буквами, но с индексом, например $U_{эл}$.

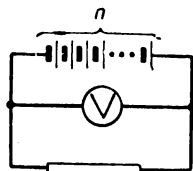


Рис. 331

На рис. 331 приведена схема последовательного соединения. При таком соединении минус первого элемента соединяется с плюсом второго, минус второго — с плюсом третьего и т. д. Плюс первого элемента и минус последнего являются зажимами батареи. Элементов в батарее может быть лю-

бое число. Особенности батареи данного соединения математически могут быть выражены так:

$$\begin{aligned} 1) I &= I_{эл}; & 2) Q &= Q_{эл}; & 3) E &= nE_{эл}; \\ 4) U &= nU_{эл}; & 5) R_0 &= nR_{0\ эл}, \end{aligned}$$

где n — число элементов в батарее.

Первая особенность следует из того, что ток в последовательной цепи везде одинаков, величина же тока, получаемого от батареи, не может быть больше номинального тока одного элемента.

Вторая особенность является результатом первой, т. е. если равенство $I = I_{эл}$ умножить на разрядное время t_p (которое одинаково для батареи и для каждого элемента), то получим

$$It_p = I_{эл}t_p.$$

Но $I_{эл}t_p = Q_{эл}$ — емкость одного элемента, а $It_p = Q$ — емкость батареи.

Третья особенность физически означает, что каждый единственный заряд, проходя поочередно через все элементы, получает от каждого из них энергию в виде электродвижущей силы, поэтому полная энергия, получаемая зарядом от всех элементов, равна сумме их электродвижущих сил, а эта полная энергия и есть электродвижущая сила батареи.

Четвертая особенность есть следствие третьей: раз электродвижущая сила увеличивается в n раз, то и напряжение, как часть электродвижущей силы, увеличивается во столько же раз.

Наконец, последняя особенность, касающаяся величины эквивалентного внутреннего сопротивления батареи, следует из аналогичного, т. е. последовательного, соединения приемников (при таком соединении сопротивления складываются).

Выводы.

1. От батареи из n последовательно соединенных элементов можно получить напряжение в n раз большее, чем напряжение одного элемента.

2. Внутреннее сопротивление батареи из n элементов возрастает в n раз по сравнению с сопротивлением одного элемента.

Применяется последовательное соединение в тех случаях, когда требуется более высокое напряжение по сравнению с напряжением одного элемента. В случае если емкости элементов будут неодинаковы, то элементы с меньшей емкостью могут разрядиться до нуля раньше, чем остальные элементы разрядятся до конечного напряжения (0,7 в), а это приведет к значительному преждевременному понижению напряжения у батареи, что недопустимо для приемников.

Схема параллельного соединения элементов изображена на рис. 332. Особенности такого соединения следующие:

$$\begin{aligned} 1) \quad I &= mI_{\text{эл}}; & 2) \quad Q &= mQ_{\text{эл}}; & 3) \quad E &= E_{\text{эл}}; \\ 4) \quad U &= U_{\text{эл}}; & 5) \quad R_0 &= \frac{R_{0\text{эл}}}{m}, \end{aligned}$$

где m — число элементов, соединенных параллельно.

Первая особенность соединения следует из первого правила Кирхгофа.

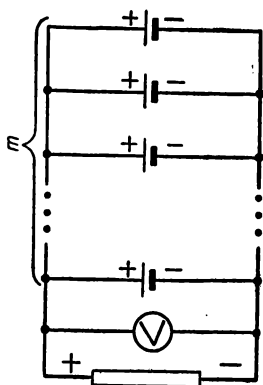


Рис. 332

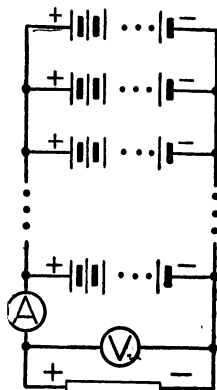


Рис. 333

Вторая особенность вытекает из первой. Для подтверждения сказанного достаточно равенство $I = mI_{\text{эл}}$ умножить на разрядное время t_p .

Третья особенность физически означает, что каждый единственный заряд проходит лишь через один элемент и от него получает энергию в виде электродвижущей силы. А так как за счет этой энергии заряд совершает движение по всей замкнутой цепи, то электродвижущая сила батареи численно равна электродвижущей силе одного элемента.

Две последние особенности аналогичны особенностям параллельного соединения приемников.

Выводы.

1. От батареи из m параллельно соединенных элементов можно получить ток и емкость в m раз большие, чем у одного элемента.

2. Внутреннее сопротивление у батареи из m элементов в m раз уменьшается по сравнению с сопротивлением одного элемента.

На практике батареи из параллельно соединенных элементов не применяются из-за незначительной величины напряжения. Если элементы имеют различную по величине элек-

тродвижущую силу, то в батарее на холостом ходу возникают уравнивающие токи между отдельными элементами (элемент с большей электродвижущей силой посылает токи в элементы с меньшими электродвижущими силами), что приводит к разряду элементов и к понижению их емкости.

Схема смешанного соединения элементов изображена на рис. 333. Особенности данного соединения следующие:

$$1) I = mI_{эл}; \quad 2) Q = mQ_{эл}; \quad 3) E = nE_{эл};$$

$$4) U = nU_{эл}; \quad 5) R_0 = \frac{R_{0\text{ эл}}n}{m}.$$

Поскольку смешанное соединение представляет собой лишь комбинацию первых двух соединений, то и особенности у него такие же, как у этих соединений.

Вывод. При смешанном соединении элементов от батареи теоретически можно получить любое значение всех пяти электрических величин.

На практике, однако, вопрос о применении такой батареи в каждом отдельном случае решается в зависимости от данных конкретных условий.

В. СВИНЦОВЫЕ СТАРТЕРНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

§ 151. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АККУМУЛЯТОРОВ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В НИХ

Аккумуляторы иначе называются вторичными гальваническими элементами, так как для превращения их в источники тока требуется предварительный электролиз их электролита, или, как говорят иначе, заряд.

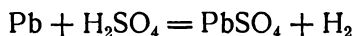
От обычных гальванических элементов аккумуляторы выгодно отличаются тем, что после разряда они опять могут быть заряжены; при хорошем уходе за ними и при нормальных условиях эксплуатации аккумуляторы выдерживают несколько тысяч зарядов и разрядов.

В настоящее время на практике применяют свинцовые и кадмиево-никелевые аккумуляторы. У первых электролитом служит раствор серной кислоты, а у вторых — раствор щелочей (KOH, NaOH) в воде. Свинцовые аккумуляторы называются также кислотными, а кадмиево-никелевые — щелочными.

Принцип работы аккумуляторов, как уже отмечалось, основан на явлении поляризации электродов при электролизе.

Простейший кислотный аккумулятор представляет собой две свинцовые пластины, опущенные в электролит (рис. 334, а). В результате химической реакции замещения пластины по-

крываются слабым налетом сернокислого свинца PbSO_4 , как это следует из формулы



Такое состояние пластин соответствует разряженному аккумулятору. Если теперь аккумулятор включить на заряд, т. е. подсоединить его хотя бы к генератору постоянного тока (рис. 334, б), то в нем вследствие электролиза начнется поляризации пластин.

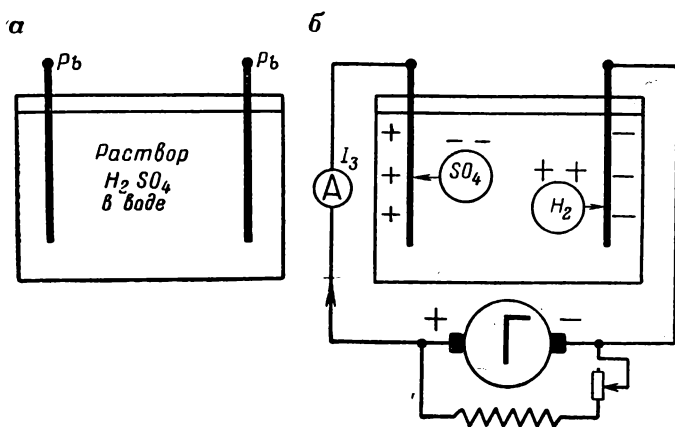


Рис. 334

Физические процессы, происходящие в аккумуляторе при его заряде, приведены в табл. 21.

В результате заряда аккумулятора его пластины поляризуются, т. е. изменяют вещество своей поверхности и из однородных (PbSO_4) превращаются в разнородные (Pb и PbO_2). Аккумулятор становится источником тока, причем положительной пластиной у него служит пластина, покрытая двуокисью свинца, а отрицательной — чистая свинцовая пластина. Такая поляриность пластин объясняется тем, что свинец обладает электролитической упругостью растворения, а двуокись свинца ею не обладает.

Из табл. 21 видно также, что к концу заряда концентрация электролита повышается вследствие появления в нем дополнительных молекул серной кислоты. В этом одна из особенностей свинцового аккумулятора: его электролит не остается нейтральным и сам участвует в химических реакциях при работе аккумулятора. Следует отметить, что в реальном аккумуляторе полная поляризация пластин происходит довольно долго (нормально не менее 20 час.).

Процессы, происходящие при заряде аккумуляторов

Этап процесса	Место протекания и содержание процесса		
	у пластины, соединенной с минусом источника тока	в электролите	у пластины, соединенной с плюсом источника тока
1-й этап — нейтрализация ионов	Ионы $\overset{++}{H_2}$ получают по два электрона и превращаются в нейтральные молекулы: $\overset{++}{H_2} + 2 \text{ электрона} = H_2$	Под действием электрического поля ионы начинают упорядоченное движение к пластинам: $\leftarrow \overset{++}{H_2} \quad \overset{--}{SO_4} \rightarrow$	Ионы $\overset{--}{SO_4}$ отдают по два электрона и превращаются в нейтральные молекулы: $\overset{--}{SO_4} - 2 \text{ электрона} = SO_4$
2-й этап — восстановление активных масс	Молекулы водорода вступают в химическую реакцию с серно-кислым свинцом пластины: $H_2 + PbSO_4 = Pb + H_2SO_4$	Появляются дополнительные молекулы серной кислоты за счет освобождения SO_4 с пластин	Молекулы кислотного остатка вступают в химическую реакцию с сернокислым свинцом пластины и с водой: $SO_4 + PbSO_4 + 2H_2O = PbO_2 + 2H_2SO_4$

Результаты процессов:

1. Поверхностный слой пластины, соединенной с минусом, восстанавливается в чистый свинец.
2. Пластина, соединенная с плюсом, покрывается тонким слоем двуокиси свинца.
3. Концентрация электролита повышается.

По мере того как поверхность пластин очищается от сернокислого свинца, в аккумуляторе постепенно начинается электролиз воды. К концу заряда, когда пластины полностью очищаются от сернокислого свинца, электролиз воды идет очень интенсивно и сопровождается бурным выделением кислорода и водорода. Выделение газов из электролита («кипение» электролита) является одним из признаков конца заряда аккумуляторов.

Заряженный свинцовый аккумулятор (и вообще любой аккумулятор) ничем не отличается от гальванического элемента, поэтому и физические процессы в нем при разряде аналогичны процессам, которые происходят в элементе.

К концу разряда обе пластины аккумулятора опять покрываются сернокислым свинцом, в результате чего аккумулятор перестает быть источником тока (на практике до такого полного разряда аккумулятор никогда не доводится). Вследствие образования сернокислого свинца на пластинах концентрация электролита в конце разряда понижается. Если

аккумулятор поставить на заряд, то вновь можно вызвать поляризацию, чтобы опять поставить его на разряд, и т. д.

Двуокись свинца и чистый свинец, составляющие поверхностный слой пластин заряженного аккумулятора, называются активными массами этих пластин. Благодаря активным массам и осуществляется работа аккумулятора в качестве источника тока.

Емкость свинцового аккумулятора пропорциональна количеству активной массы одной из его пластин, а так как активные массы представляют собой очень тонкий поверхностный слой (у отрицательной пластины это фактически слой поверхностных атомов), то для увеличения количества активной массы на пластинах, а следовательно, и для увеличения емкости аккумулятора необходимо увеличить поверхность его пластин.

§ 152. УСТРОЙСТВО СТАРТЕРНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Из большого числа типов свинцовых аккумуляторов мы рассмотрим только стартерные аккумуляторы, которые применяются в качестве источников тока на современных автомобилях.

Аккумуляторы этого типа не имеют отдельных сосудов и при сборке в батарее помещаются в ячейки моноблока — специального сосуда, который одновременно является и батарейным ящиком (рис. 335). Моноблоки выполняются из пластмассовых изоляционных материалов (карболита, асфальтовопечковой пластмассы и т. п.), обладающих хорошей кислотоустойчивостью и достаточной механической прочностью. На дне моноблока имеются призматические выступы, которые поддерживают пластины на некоторой высоте и этим исключают короткое замыкание между ними, которое возможно вследствие осыпания на дно частиц активной массы (шлама).

Каждый аккумулятор, входящий в батарею, состоит из двух групп пластин (для увеличения его емкости). Пластины одного знака ушками приварены к свинцовому основанию (баретке) полюсного штыря и образуют блок. При сборке аккумуляторов блоки располагают так, что их пластины вза-

имно входят в свободные промежутки, благодаря чему полярность пластин в аккумуляторе чередуется. Крайние пластины в аккумуляторе отрицательные, так как их берется на одну больше, чем положительных.

Пластины изолируют одну от другой специальными прокладками — сепараторами.

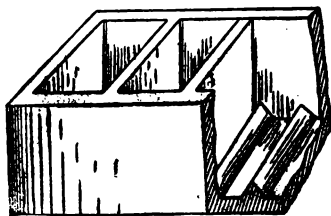


Рис. 335

Блоки пластин вместе с проложенными сепараторами помещают в ячейки моноблока, после чего на пластины кладут щиток из перфорированного (имеющего отверстия) листового эбонита или пластмассы, а на полюсные штыри для более плотного прилегания крышки надевают резиновые сальники. Благодаря перфорированному щитку исключается разбрызгивание электролита при бурном выделении газов в конце заряда.

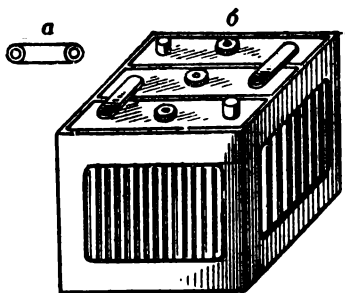


Рис. 336

Сверху ячейку моноблока закрывают пластмассовой крышкой. Крышка имеет три отверстия — крайние для полюсных штырей, а среднее для заливки электролита. В это отверстие ввинчивают пластмассовую пробку с небольшим отверстием для выхода газов.

Стыки между крышкой и моноблоком заливают специальной мастикой.

Аккумуляторы соединяют между собой массивными свинцовыми пластинами (рис. 336, а), называемыми междуэлементными соединениями. Эти соединения проушинами надевают на полюсные штыри аккумуляторов и затем приваривают к ним. Внешний вид собранной стартерной батареи показан на рис. 336, б.

Пластины у стартерных аккумуляторов применяются решетчатого типа, как обладающие большой емкостью и сравнительной дешевизной (существуют и другие типы пластин). Основаниями таких пластин служат решетки, отлитые из сплава свинца и сурьмы для большей механической прочности и химической устойчивости. Ячейки решеток заполнены пастой из порошкообразных окислов свинца на слабом растворе серной кислоты в воде. Для положительных пластин используется свинцовый сурик Pb_3O_4 , а для отрицательных — свинцовый глет PbO . После просушки пластин паста приобретает пористость, благодаря чему достигается большая емкость аккумуляторов (наружная поверхность при пористом строении получается очень большой).

Просушенные пластины подвергаются формовке, т. е. длительному заряду (до пяти суток) слабыми токами в специальном электролите. В результате такого заряда сурик превращается в двуокись свинца, а свинцовый глет — в чистый свинец, т. е. на пластинах образуются нужные активные массы.

После формовки пластины либо разряжают, либо остав-

ляют заряженными (у батарей с клеймом ПАЗ на междуэлементных соединениях), но в обоих случаях тщательно просушивают (чтобы в порах не оставался электролит) и лишь после этого собирают в блоки. С завода стартерные батареи выходят без электролита и могут храниться в таком виде до двух лет.

Для стартерных батарей принята буквенно-цифровая маркировка. Так, марка 3-СТП-80 означает: первая цифра — число аккумуляторов в батарее, СТ — стартерная батарея, П — моноблок пластмассовый, последние цифры — емкость батареи в ампер-часах. В стартерных батареях аккумуляторы соединяются только последовательно.

§ 153. ЭЛЕКТРОЛИТ, ЕГО ПРИГОТОВЛЕНИЕ И ЗАЛИВКА В АККУМУЛЯТОРЫ

Электролитом свинцовых аккумуляторов служит раствор специальной аккумуляторной серной кислоты в дистиллированной или в крайнем случае в чистой дождевой (снеговой) воде. Согласно ГОСТ 667—41 кислота может содержать определенное количество примесей других веществ.

Серная кислота — это бесцветная густая жидкость с удельным весом 1,84, одна из очень сильных кислот: она обугливает органические вещества, растворяет большинство металлов, а попадая на кожу, вызывает сильные ожоги. При соединении кислоты с водой выделяется много тепла, поэтому раствор сильно нагревается.

Наибольшей проводимостью обладают электролиты с удельным весом 1,2—1,3. Точка замерзания электролита зависит от его удельного веса, как это показано в табл. 22.

Т а б л и ц а 22

Точка замерзания электролитов в зависимости от удельного веса

Удельный вес электролита при 15° С	Точка замерзания электролита, ° С
1,1	—7
1,15	—15
1,20	—27
1,25	—52
1,29	—74
1,31	—66
1,35	—49

Приготавливать электролит можно только в свинцовых, эбонитовых, керамических, пластмассовых и стеклянных сосудах (стеклянный сосуд нельзя нагревать до высокой температу-

ры, так как он может лопнуть). Сосуд предварительно нужно тщательно вымыть и сполоснуть дистиллированной водой.

Количество кислоты, необходимое для приготовления электролита, можно определить по табл. 23. В сосуд для электролита сначала нужно налить воду, а затем тонкой струей вливать в нее кислоту, все время размешивая раствор стеклянной палочкой. Вливать воду в чистую кислоту нельзя, так как вследствие большого выделения тепла вода, испаряясь, увлекает кислоту, брызги которой могут попасть на кожу или в глаза. В случае попадания кислоты на кожу пораженные места нужно промыть слабым раствором соды (питьевой), а затем чистой водой.

Для безопасности во время приготовления электролита следует пользоваться защитными очками, а на руки надевать резиновые перчатки.

Таблица 23

Количество кислоты, необходимое для приготовления электролитов

Удельный вес электролита	Содержание кислоты в одном литре воды при 15° С	
	г	см ³
1,125	214,3	116,4
1,152	268,6	145,8
1,171	308,6	167,8
1,190	351,7	191,0
1,210	399,6	216,8
1,230	454,7	246,5
1,262	534,2	290,0
1,285	598,0	324,7
1,308	670,0	363,8

Приготовленный электролит необходимо охладить до комнатной температуры и затем измерить его удельный вес ареометром. Ареометр — это прибор, состоящий из стеклянной трубки и баллончика (рис. 337, а). На дне баллончика для утяжеления имеется немного дроби, залитой воском. В трубке укреплена шкала с делениями удельного веса.

Для измерения удельного веса ареометр погружают в электролит и по делению шкалы, совпадающему с уровнем электролита, производят отсчет (чем меньше удельный вес, тем больше ареометр погружается в электролит, и наоборот). Чтобы было удобнее пользоваться ареометром, его помещают в стеклянную трубку, на одном

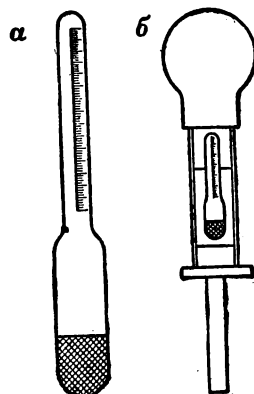


Рис. 337

конце которой имеется резиновая груша, а на другом резиновый наконечник с эбонитовой трубкой (рис. 337, б).

Для измерения удельного веса электролита эбонитовую трубку вводят в заливочное отверстие аккумулятора и с помощью груши всасывают в стеклянную трубку нужное количество электролита (чтобы в нем всплыл ареометр). После отсчета удельного веса по шкале электролит выливают обратно в аккумулятор.

Горячим электролитом (с температурой выше 30° С) аккумуляторы заливать нельзя, так как при этом на пластинах образуется сернокислый свинец крупнокристаллического строения (сульфат свинца), который при зарядке аккумулятора не сходит с пластин, уменьшая их емкость.

Для заливки электролита в аккумуляторы используют стеклянную воронку или резиновую грушу. Уровень электролита в аккумуляторе должен быть на 10—15 мм выше верхней кромки пластин. Для проверки уровня в аккумулятор через заливочное отверстие опускают стеклянную трубку до упора ее в перфорированный щиток. Затем, прикрыв верхний конец трубки пальцем, вынимают ее. Высота столбика электролита в вынутой трубке и указывает уровень электролита над пластинами.

Вследствие изменения концентрации электролита при заряде и разряде аккумуляторов его удельный вес также изменяется, поэтому нормальным удельным весом считают тот, который имеет электролит заряженного аккумулятора.

§ 154. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И СВОЙСТВА СВИНЦОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Электрические данные

Электродвижущая сила свинцовых аккумуляторов определяется в основном веществом активных масс пластин. У заряженного аккумулятора при нормальной плотности его электролита электродвижущая сила в среднем равна 2 в. Установлено, что величина электродвижущей силы зависит и от удельного веса электролита:

$$E = 0,84 + \text{удельный вес электролита.}$$

Внутреннее сопротивление аккумуляторов, как и гальванических элементов, складывается из сопротивления электролита и сопротивления самих пластин. По величине внутреннее сопротивление очень мало и даже у самых небольших аккумуляторов не превышает тысячных долей ома. Это очень ценное качество свинцовых аккумуляторов, благодаря которому они могут дать больший разрядный ток, чем щелочные аккумуляторы такого же размера.

Напряжение на зажимах аккумулятора различают разрядное U_p и зарядное U_z .

График разрядного напряжения свинцовых аккумуляторов такой же, как и график гальванических элементов (рис. 330). Начальное разрядное напряжение $U_{p.н}$ при двадцатичасовом разряде аккумулятора нормальным током составляет примерно 2 в, а конечное разрядное напряжение $U_{p.к}$ — не ниже 1,8 в. Более глубокий разряд аккумуляторов не допускается, так как приводит к образованию крупнокристаллического сернокислого свинца на пластинах.

При заряде аккумулятора величина подводимого к нему напряжения U_z от зарядного источника тока (генератора) определяется формулой

$$U_z = E_{ак} + I_z R_{ак},$$

где $E_{ак}$ — электродвижущая сила аккумулятора;
 $R_{ак}$ — его внутреннее сопротивление;
 I_z — зарядный ток.

Если в процессе заряда аккумулятора записывать показания вольтметра, то можно построить кривую зарядного напряжения. Такая кривая показана на рис. 338.

Постепенное повышение зарядного напряжения примерно от 2 до 2,3 в объясняется увеличением электродвижущей силы вследствие увеличения удельного веса электролита, а также и тем, что ионам электролита приходится проникать в более глубокие поры пластин и это несколько увеличивает сопротивление для зарядного тока.

Резкое увеличение зарядного напряжения от 2,3 до 2,75 в происходит оттого, что при напряжении в 2,3 в активные массы на пластинах почти полностью восстанавливаются и в аккумуляторе начинается интенсивный электролиз воды. Однако, как показывает опыт, этот электролиз при свинцовых электродах требует более высокого напряжения, чем при платиновых, поэтому зарядное напряжение и повышается до 2,75 в и в дальнейшем остается уже неизменным.

Таким образом, начальное зарядное напряжение U_{zn} свинцовых аккумуляторов равно 2 в, а конечное $U_{зк}$ — примерно 2,75 в.

Емкость Q свинцовых аккумуляторов зависит от их размеров, которые определяют собой количество активных масс на пластинах. Гарантируемую заводом емкость аккумулятор

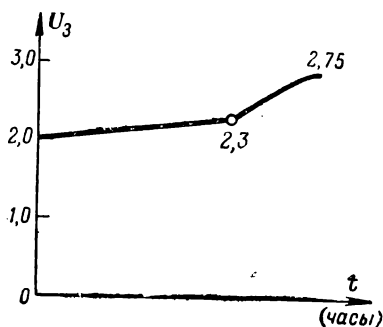


Рис. 338

может отдать только при двадцатичасовом разряде нормальным током при температуре 15° С. Величина нормального разрядного тока определяется из формулы

$$Q = I_p t_p,$$

отсюда

$$I_p = \frac{Q}{20} \text{ ампер.} \quad (161)$$

С повышением разрядного тока емкость аккумулятора понижается, так как не используются активные массы в глубоких порах пластин (сернокислый свинец не допускает электролит в глубокие поры). При понижении температуры электролита емкость также уменьшается вследствие увеличения внутреннего сопротивления аккумулятора. В результате разрядное напряжение быстрее достигает своего конечного предела ($U_p = E_{ак} - I_p R_{ак}$). Для получения от аккумуляторов полной емкости следует утеплять их в зимних условиях работы.

Основные электрические и эксплуатационные данные для некоторых типов стартерных батарей приводятся в табл. 24.

Свойства аккумуляторов

Основным недостатком свинцовых аккумуляторов является их **значительный саморазряд**, который в сутки в среднем составляет 1% их номинальной емкости. Из-за саморазряда аккумуляторы, находящиеся на хранении, необходимо периодически подзаряжать, что усложняет уход за ними и приводит к излишнему расходу энергии.

Главная причина саморазряда заключается в том, что электролит свинцовых аккумуляторов не является химически нейтральным по отношению к активным массам пластин. Вследствие этого активная масса отрицательных пластин независимо от того, работает аккумулятор на внешнюю цепь или нет, постепенно переходит в сернокислый свинец:



Чем выше температура и удельный вес электролита, тем интенсивнее проходит реакция.

Другая причина саморазряда отрицательных пластин заключается в их разнородности из-за содержания в решетке сурьмы.

Саморазряд ограничивает область применения свинцовых аккумуляторов, и их используют лишь в случае крайней необходимости, когда аккумуляторы других систем не подходят.

Таблица 24

Основные электрические и эксплуатационные данные стартерных батарей

Тип батареи	Количество аккумулято- ров в батарее, шт.	Напряжение батареи, в	Номинальная емкость, а-ч	Нормальный разрядный ток, а	Емкость при 10-часовом разряде, а-ч	Объем элек- тролита в одном аккумуляторе, л	Вес батареи с электролитом, кг	Размеры, мм			В чем собрана батарея
								Длина	ширина	высота	
3-СТМ-80	3	6	80	4,0	70	0,7	18	243	187	224	Эбонитовый моно- блок
3-СТП-80	3	6	80	4,0	70	0,7	20,0	256	192	227	Пластмассовый мо- ноблок
3-СТМ-100	3	6	100	5,0	84	0,82	21,0	266	185	219	Эбонитовый моно- блок
3-СТП-112	3	6	112	5,6	98	0,8	25,0	303	182	238	Пластмассовый мо- ноблок
6-СТЭ-144	6	12	144	7,2	126	1,0	65,0	525	279	259	Деревянный ящик; аккумуляторы в эбо- нитовых сосудах

§ 155. ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ СТАРТЕРНЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Заряд батарей

Для свинцовых аккумуляторов следует различать первый заряд и нормальный заряд. Первый заряд сообщается новым аккумуляторам, а также аккумуляторам, которые переводятся в эксплуатацию после сухого хранения (до хранения уже были в эксплуатации). Нормальный заряд сообщается

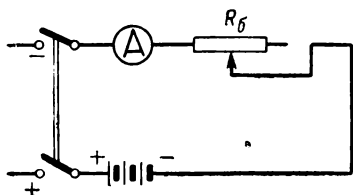


Рис. 339

всем аккумуляторам, находящимся в эксплуатации, после их нормального разряда, т. е. разряда до напряжения не ниже 1,8 в.

Первый заряд. Пластины стартерных аккумуляторов выпускаются заводом либо в заряженном, либо в разряженном состоянии. В соответствии

с этим и удельный вес электролита для заливки в аккумуляторы получается различным. Для аккумуляторов с заряженными пластинами он должен быть 1,29, а с разряженными — 1,12. У первых аккумуляторов удельный вес электролита после первого заряда почти не изменяется, а у вторых повышается до нормального.

Аккумуляторы, которые переводятся в эксплуатацию после сухого хранения, также нужно заливать электролитом с удельным весом в 1,12, так как при постановке на сухое хранение они предварительно разряжаются.

Для лучшего пропитывания активных масс пластин электролит заливают в аккумуляторы за 6 час. до начала заряда. На заряд аккумуляторы включают по схеме, изображенной на рис. 339. В этой схеме R_6 — балластный реостат для поглощения излишнего напряжения зарядного источника тока (генератора). Величину сопротивления балластного реостата можно определить по формуле

$$R_6 = \frac{U_{\text{ист}} - n \cdot 2,75}{I_{\text{зк}}}, \quad (162)$$

где $U_{\text{ист}}$ — напряжение зарядного источника;

n — число аккумуляторов, соединенных для заряда последовательно;

2,75 — конечное зарядное напряжение на одном аккумуляторе;

$I_{\text{зк}}$ — конечный зарядный ток,

Реостат должен быть рассчитан на нормальный зарядный ток аккумулятора. Этот ток можно определить по формуле

$$I_3 = \frac{Q}{16}, \quad (163)$$

где Q — номинальная емкость аккумулятора.

При одновременном заряде нескольких однотипных батарей их соединяют последовательно. Перед подключением аккумуляторов к источнику необходимо точно установить полярность зажимов источника, а также батареи и собрать схему так, чтобы после включения рубильника плюс источника был присоединен к плюсу батареи, иначе произойдет изменение полярности пластин у аккумуляторов и они могут выйти из строя.

Полярность зарядного источника можно определить по вольтметру магнитоэлектрической системы. Для этого вольтметр достаточно присоединить так, чтобы он дал показание, тогда плюс вольтметра будет соединен с плюсом источника. Полярность зажимов у новых батарей помечают плюсом и минусом на полюсных штырях.

Первый заряд аккумуляторов производят так:

1. От 15 до 38 час. аккумуляторы заряжают нормальным током, пока зарядное напряжение на каждом аккумуляторе не поднимется до 2,4 в.

2. После этого зарядный ток уменьшают наполовину и продолжают заряд еще 20—38 час. до появления признаков конца заряда.

Признаками конца заряда являются:

1. Бурное выделение газов («кипение» электролита).

2. Постоянство зарядного напряжения на каждом аккумуляторе в течение двух часов.

3. Постоянство удельного веса электролита в течение двух часов.

Заряд считается законченным, если имеются все три признака.

Нормальный заряд. От первого заряда нормальный заряд отличается продолжительностью и величиной зарядного тока.

Включению аккумуляторов на заряд предшествует их подготовка к заряду. Подготовка заключается в том, что у аккумуляторов проверяются уровень и удельный вес электролита, а также степень их разряженности. Если уровень электролита низок, а удельный вес немногим отличается от 1,12, то для повышения уровня в аккумулятор достаточно подлить дистиллированной воды. В случае же очень низкого удельного веса его необходимо повысить до 1,12, добавив в электролит более крепкого раствора.

Степень разряженности батареи необходимо знать для того, чтобы установить, не доведена ли батарея до глубокого разряда, и определить примерную продолжительность заряда.

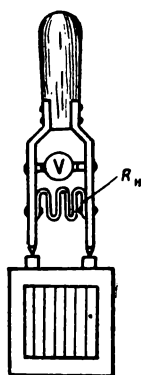


Рис. 340

Если батарея разряжена наполовину, то и заряд ее будет продолжаться меньше, чем нормальный (излишний заряд приводит к отрыву частиц активных масс выделяющимися газами). Степень разряженности аккумулятора устанавливают по величине разрядного напряжения, которое с течением времени уменьшается примерно пропорционально уменьшению емкости.

Для определения степени разряженности пользуются специальным прибором, называемым аккумуляторным пробником, или нагрузочной вилкой. Прибор состоит из трехвольтового магнитоэлектрического вольтметра с двусторонним отклонением стрелки и нагрузочного сопротивления R_n в виде металлической ленты, соединенных параллельно (рис. 340). Величина нагрузочного сопротивления составляет примерно 0,02 ом.

Для удобства пользования в приборе имеются рукоятка и два металлических стержня — щупа с заостренными концами. С помощью щупов прибор подсоединяют к испытуемому аккумулятору (заостренные концы щупов вдавливают в полюсные штыри), как показано на рис. 340. После подсоединения пробника напряжение по вольтметру должно устойчиво держаться в течение 5 сек.; затем пробник отсоединяют. По полученной величине напряжения, а также по табл. 25 устанавливают степень разряженности аккумуляторов.

Таблица 25

Степень разряженности аккумуляторов

Величина разрядного напряжения по пробнику, в	Степень разряженности аккумулятора, %
1,85—1,8	0 (аккумулятор заряжен)
1,7—1,65	50
1,5—1,45	75
1,3	100

При измерении напряжения по нагрузочному сопротивлению идет очень большой ток (не менее 60 а), поэтому конечное разрядное напряжение получается значительно меньше, чем при нормальном разрядном токе, т. е. меньше 1,8 в ($U_p = E_{ак} - I_p R_{ак}$). Определять степень разряженности только одним вольтметром, без нагрузочного сопротивления, нельзя, потому что вольтметр на холостом ходу измеряет электродвижущую силу аккумулятора, а она у него почти не изменяется.

После подготовки аккумуляторы включают на заряд так же, как при первом заряде (с соблюдением полярности).

Нормальный заряд производят так:

1. Вначале на протяжении 5—6 час. заряд ведут двойным нормальным током, пока напряжение на каждом аккумуляторе не достигнет 2,4 в.

2. После этого зарядный ток уменьшают до нормального и продолжают заряд в течение 15—18 час., до появления признаков конца заряда.

В процессе заряда как нормального, так и первого необходимо соблюдать следующие правила:

1. Держать пробки аккумулятора открытыми для лучшего выхода газов.

2. Поддерживать неизменным зарядный ток (вследствие увеличения электродвижущей силы в аккумуляторе зарядный ток постепенно уменьшается, поэтому примерно через каждый час его необходимо увеличивать до нужной величины, уменьшая сопротивление балластного реостата).

3. Следить за тем, чтобы температура электролита была не выше 40° С (иначе образуется крупнокристаллический сернокислый свинец).

4. Вентилировать помещение и не входить в него с открытым огнем (чтобы не вызвать взрыва гремучего газа).

Через 2—3 часа после заряда нужно проверить удельный вес электролита и довести его до необходимой величины¹.

Разряд батарей

При разряде стартерных батарей необходимо соблюдать два правила:

1) не разряжать батарею ниже конечного разрядного напряжения (по нагрузочной вилке не ниже 1,3 в);

2) не оставлять батарею разряженной больше чем на 24 часа (ставить на очередной заряд).

Несоблюдение этих правил ведет к образованию крупнокристаллического сернокислого свинца на пластинах и, следовательно, к понижению емкости аккумуляторов.

Уход за батареями

Для обеспечения более длительного срока службы аккумуляторов и постоянной их готовности к действию необходимо соблюдать следующие правила ухода за аккумуляторами, находящимися в эксплуатации:

1. Не реже одного раза в шестидневку удалять с наружных металлических частей батареи пыль, грязь и особенно

¹ В средней полосе СССР удельный вес электролита должен быть: летом — 1,27, зимой — 1,285; в южных районах летом удельный вес необходимо снизить до 1,24.

кислотные выделения (белый налет). Для нейтрализации выделений протирать части ветошью, смоченной в слабом растворе соды, после чего их насухо вытереть.

2. Следить за тем, чтобы уровень электролита, особенно в жаркую погоду, когда вода быстро испаряется, был не ниже нормального (добавлять дистиллированной воды).

3. Во избежание замерзания электролита зимой повышать его удельный вес в соответствии с температурой воздуха и утеплять аккумуляторы.

4. Во избежание внутреннего короткого замыкания один раз в шесть месяцев промывать аккумуляторы дистиллированной водой для удаления из них шлама.

5. На каждую батарею вести журнал, в котором отмечать дату и режим заряда батареи, а также продолжительность разряда, неисправности, ремонт и т. п.

§ 156. ХРАНЕНИЕ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

Стартерные батареи можно хранить в сухом виде и с электролитом, в заряженном состоянии.

В сухом виде, как правило, следует хранить только новые батареи, еще не бывшие в употреблении. При длительном хранении батареи устанавливают на стеллажах, в специально приспособленных отапливаемых зимой помещениях. Пробки батарей должны быть плотно завинчены. Под пробки на заводе подкладывается уплотнительный резиновый диск, не пропускающий влагу внутрь через газовые отверстия в пробке; при переводе батареи в эксплуатацию диск удаляется. Срок хранения батарей со дня выпуска с завода — не более двух лет.

Батареи, бывшие в употреблении, хранятся обычно с электролитом, в заряженном состоянии. Из-за саморазряда батареи один раз в месяц подзаряжаются нормальным зарядным током до появления признаков конца заряда, а одни раз в два месяца разряжаются нормальным током и опять заряжаются. Перевод таких батарей на сухое хранение не рекомендуется, так как очень трудно просушить пластины батареи в собранном виде.

В крайнем случае для перевода батареи на сухое хранение ее необходимо разрядить нормальным током до 1,8 в на одном аккумуляторе, слить электролит и залить аккумуляторы дистиллированной водой. Воду менять через каждые 3 часа (всего три — четыре раза), пока в ней не перестанет чувствоваться язык кислоты. После промывки батарею необходимо тщательно просушить и герметически закрыть заливочные отверстия, проложив под пробки уплотнительные диски. В таком виде батарею можно хранить не более шести месяцев.

Во всех случаях свинцовые аккумуляторы нужно хранить отдельно от щелочных, так как кислотные выделения, попадая в щелочные аккумуляторы, портят их.

Г. КАДМИЕВО-НИКЕЛЕВЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

§ 157. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АККУМУЛЯТОРАХ

Кадмиево-никелевые, или щелочные, аккумуляторы появились значительно позже свинцовых и по сравнению с ними представляют собой более совершенные химические источники тока. Главное преимущество щелочных аккумуляторов перед свинцовыми заключается в химической нейтральности их электролита по отношению к активным массам пластин. Благодаря этому саморазряд у щелочных аккумуляторов получается значительно меньше, чем у свинцовых. Принцип действия щелочных аккумуляторов также основан на явлении поляризации электродов при электролизе.

Рассмотрим физические процессы, которые происходят в аккумуляторах при их заряде и разряде.

Активной массой положительных пластин аккумуляторов является гидрат окиси никеля $\text{Ni}(\text{OH})_3$. Для увеличения проводимости этого химического соединения в него добавляется до 20% порошкообразного графита. У отрицательных пластин активная масса представляет собой механическую смесь порошкообразного железа Fe и кадмия Cd .

Электролитом в аккумуляторах служит раствор едкого кали KOH или едкого натра NaOH в воде. Молекулы этих щелочей под действием воды образуют положительно заряженные ионы соответствующих металлов ($\overset{+}{\text{K}}$, $\overset{+}{\text{Na}}$) и отрицательно заряженные ионы гидроксила (OH^-).

Процессы, происходящие при разряде аккумуляторов, приводятся в табл. 26.

Таблица 26

Процессы, происходящие при разряде щелочных аккумуляторов

Этап процесса	Место протекания и содержание процесса		
	у отрицательно заряженной пластины	в электролите	у положительно заряженной пластины
1-й этап — холостой ход аккумулятора	Под действием электролитической упругости растворения ионы $\overset{++}{\text{Fe}}$ и кадмия $\overset{++}{\text{Cd}}$ входят в раствор и заряжают пластину отрицательно	Хаотическое движение ионов $\overset{+}{\text{K}}$ и OH^-	Ионы калия $\overset{+}{\text{K}}$ проникают из электролита к пластине и заряжают ее положительно

Этап процесса	Место протекания и содержание процесса		
	у отрицательно заряженной пластины	в электролите	у положительно заряженной пластины
2-й этап — режим нагрузки	<p>После ухода электронов с пластины ионы $\overset{++}{\text{Fe}}$ соединяются с ионами OH^- и образуют гидрат закиси железа:</p> $\overset{++}{\text{Fe}} + 2\text{OH}^- = \text{Fe}(\text{OH})_2$	<p>1. Происходит двустороннее упорядоченное движение ионов:</p> $\leftarrow \text{OH}^- \overset{+}{\text{K}} \rightarrow$ <p>2. Количество едкого кали в электролите не изменяется</p>	<p>1. Ионы $\overset{+}{\text{K}}$ нейтрализуются приходящими на пластину электронами:</p> $\overset{+}{\text{K}} + 1 \text{ электрон} = \text{K}$ <p>2. После нейтрализации вступают в химическую реакцию с гидратом окиси никеля:</p> $2\text{Ni}(\text{OH})_3 + 2\text{K} = 2\text{Ni}(\text{OH})_2 + 2\text{KOH}$

Результаты процессов:

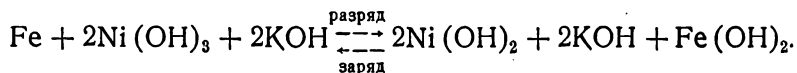
1. Активные массы обеих пластин переходят в гидраты закисей металлов (железа и никеля).
2. Удельный вес электролита остается неизменным.

В таблице показано участие в процессах только ионов железа; ионы кадмия принимают в этих процессах такое же участие. Из таблицы видно, что электролит не изменяет своего удельного веса при разряде, поэтому его можно считать химически нейтральным по отношению к активным массам пластин.

С переходом активных масс в гидраты закисей металлов (никеля и железа) аккумулятор перестает быть источником тока. На практике аккумулятор не доводится до такого глубокого разряда. При заряде аккумулятора активные массы его пластин опять восстанавливаются.

Физические процессы, происходящие в аккумуляторе при заряде, приведены в табл. 27.

Из сравнения процессов при заряде и разряде можно прийти к выводу, что эти процессы обратимы, поэтому могут быть выражены одной общей формулой



Точно так же, как и в свинцовом аккумуляторе, по мере восстановления активных масс пластин в электролите начинается электролиз воды. К концу заряда электролиз сопровождается бурным выделением газов.

Процессы, происходящие при заряде щелочных аккумуляторов

Этап процесса	Место протекания и содержание процесса		
	у пластины, соединенной с минусом зарядного источника	в электролите	у пластины, соединенной с плюсом зарядного источника
1-й этап — нейтрализация ионов	Ионы K^+ получают по одному электрону и превращаются в нейтральные атомы калия: $K^+ + 1 \text{ электрон} = K$	Под действием электрического поля ионы начинают двустороннее движение: $\leftarrow K^+ \quad OH^- \rightarrow$	Ионы OH^- отдают по одному электрону и превращаются в нейтральные молекулы гидроксила: $OH^- - 1 \text{ электрон} = OH$
2-й этап — восстановление активных масс	После нейтрализации атомы калия вступают в химическую реакцию с гидратом закиси железа: $2K + Fe(OH)_2 = Fe + 2KOH$	1. Ионы продолжают движение 2. Количество едкого кали в электролите не изменяется	После нейтрализации молекулы гидроксила вступают в химическую реакцию с гидратом закиси никеля: $2OH + 2Ni(OH)_2 = 2Ni(OH)_3$

Результаты процессов:

1. Активные массы на пластинах восстанавливаются.
2. Удельный вес электролита остается неизменным.

§ 158. УСТРОЙСТВО ЩЕЛОЧНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ И БАТАРЕЙ

Главными частями каждого аккумулятора являются две группы пластин и сосуд с электролитом.

Пластины обоих знаков устроены одинаково. Каждая пластина состоит из двух стальных желобообразных стоек, или ребер (рис. 341, а), и нескольких пакетов с активной массой.

Пакеты изготавливаются из тонкой стальной перфорированной ленты. Отверстия в ленте делают очень малыми, чтобы предотвратить выпадение зерен активной массы. У положительных пластин лента с обеих сторон никелируется, чтобы не снижалась емкость пластин вследствие загрязнения активной массы железом. С этой же целью никелируются и стойки пластин. Лента и стойки отрицательных пластин не никелируются. Пакеты с активной массой под давлением пресса зажимаются в стойки пластин.

Пластины одного знака привариваются к стальному основанию полюсного штыря (рис. 341, б), для чего одна из стоек

у пластин делается несколько длиннее. Положительных пластин в аккумуляторе на одну больше, чем отрицательных (из-за большего объема, занимаемого активной массой), поэтому в сосуде они стоят крайними.

Полюсный штырь в щелочных аккумуляторах называется выводным борном; свободный конец борна имеет винтовую нарезку. На каждый борн надевается стальная шайба, поверх нее — эбонитовая шайба, а затем — резиновый сальник для более плотного соединения борна с крышкой сосуда.

Сосуд щелочных аккумуляторов изготавливается из листовой стали и для уменьшения коррозии снаружи никелируется. Для большей жесткости стенки сосуда гофрируются. Дно и крышка сосуда приварные, причем дно приваривается последним, так как сборка аккумулятора производится со стороны дна.

В крышке сосуда имеются три отверстия: два крайних для выхода борнов, а среднее для заливки электролита. В это отверстие ввинчивается стальная пробка вентильного типа, имеющая газовые отверстия, прикрытые снаружи резиновым кольцом. Благодаря такому устройству пробки в сосуд не проникает воздух (углекислота воздуха портит электролит) и в то же время обеспечивается выход газов из аккумулятора. В верхней части пробка имеет шлиц для лезвия отвертки. Для уплотнения на пробку надевается резиновый сальник.

К боковым стенкам сосуда приваривается по две стальные цапфы, с помощью которых аккумулятор удерживается в батарейном ящике.

При сборке аккумулятора сначала складывают вместе блоки, как в свинцовом аккумуляторе, затем эбонитовыми палочками изолируют одну от другой пластины, после чего оба блока плотно вставляют в сосуд до упора сальниками борнов в крышку. При таком устройстве аккумуляторов положительные пластины оказываются не изолированными от сосуда, поэтому сосуд и борн положительных пластин имеют одинаковые потенциалы, т. е. сосуд сам является плюсом в аккумуляторе. Отрицательные пластины и их борн, наоборот, тщательно изолируются от корпуса сосуда. Оба блока пластин плотно прижимаются гайками к крышке сосуда. После окончания сборки аккумулятора к его сосуду приваривают дно.

В разборке щелочных аккумуляторов нет необходимости,

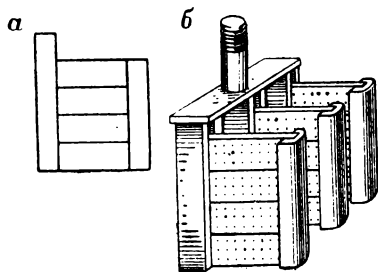


Рис. 341

так как их конструкция очень надежная и долговечная. Размеры сосуда делаются такими, что над пластинами остается необходимое газовое пространство, а ниже — грязевое пространство на случай выпадения активных масс из пакетов. Для лучшей защиты от коррозии и от разъедания ползучими белыми солями, которые выделяются из электролита, всю наружную поверхность сосуда покрывают битумным лаком.

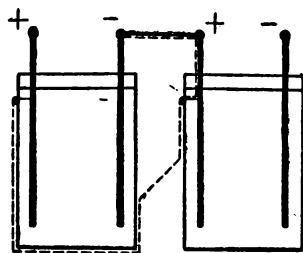


Рис 342.

При соединении аккумуляторов в батарее их помещают либо в деревянные ящики с крышками, либо в открытые деревянные клетки (для удобства ухода). В батарейных ящиках или в клетках аккумуляторы удерживаются с помощью цапф, которые входят в резиновые втулки, вставленные в гнезда внутренних стенок ящиков или клеток.

Между собой аккумуляторы соединяются стальными никелированными пластинками, которые надеваются на борны и прижимаются к ним гайками. Сосуды в батарейном ящике должны быть изолированы один от другого, так как они соединены с положительными зажимами аккумулятора. Касание двух соседних сосудов в батарее равносильно короткому замыканию одного из аккумуляторов. На рис. 342 путь тока при касании двух сосудов показан пунктиром.

Для изоляции между сосудами оставляют свободные промежутки (воздушная изоляция) либо отделяют один сосуд от другого изолирующими прокладками. В батареях аккумуляторы чаще всего соединяются последовательно, но бывают батареи и со смешанным соединением аккумуляторов.

Фонарные аккумуляторные батареи состоят всего из двух аккумуляторов, соединенных последовательно. В таких батареях сосуд одного аккумулятора соединяют с отрицательными пластинами (ставятся крайними в аккумуляторе). Для последовательного соединения аккумуляторов их сосуды приваривают один к другому.

Выгода подобного соединения аккумуляторов в батарее в том, что, во-первых, отпадает необходимость в двух борнах и в междуэлементном соединении, а во-вторых, уменьшаются и размеры батареи, так как не нужно оставлять промежутков между сосудами.

Для щелочных аккумуляторов и батарей принята буквенно-цифровая маркировка, аналогичная маркировке стартерных батарей. Так, в маркировке 5-НКН-45 цифры и буквы означают: первая цифра — число аккумуляторов в батарее; буква Н — назначение батареи (батарея для питания цепей накала

радиоламп); КН — кадмиево-никелевые аккумуляторы; последние цифры — емкость одного аккумулятора в ампер-часах.

§ 159. ЭЛЕКТРОЛИТ ЩЕЛОЧНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ, ЕГО ПРИГОТОВЛЕНИЕ И ЗАЛИВКА В АККУМУЛЯТОРЫ

Электролит щелочных аккумуляторов должен иметь различный состав в зависимости от температуры окружающего воздуха, чтобы аккумуляторы работали более устойчиво, сохраняя неизменной величину гарантированной емкости.

Установлено также, что для приготовления электролита наряду с дистиллированной, а также чистой дождевой или снеговой водой можно использовать речную, озерную или грунтовую воду, пригодную для питья. Последнее обстоятельство имеет большое значение при эксплуатации аккумуляторов, так как на практике дистиллированную воду не всегда можно достать.

В настоящее время для работы аккумуляторов в различных температурных условиях рекомендуются следующие составы электролита:

1. Для температур от -15 до $+40^{\circ}\text{C}$ — раствор едкого кали с удельным весом 1,19—1,21 с добавлением 10—15 г едкого лития на каждый литр раствора.

2. Для температур ниже -15°C — раствор едкого кали с удельным весом 1,26—1,3.

3. Для температур выше $+40^{\circ}\text{C}$ — раствор едкого натра с удельным весом 1,17—1,19 с добавлением 15 г едкого лития на каждый литр раствора.

Указанные растворы можно применять и без едкого лития, однако при этом будет несколько понижаться емкость аккумуляторов.

Все перечисленные щелочи (едкое кали КОН, едкий натр NaOH, едкий литий LiOH) представляют собой твердые бесцветные гигроскопические вещества, которые на большинство соприкасающихся с ними материалов оказывают разъедающее действие (отсюда их название едкие щелочи). В воде щелочи очень хорошо растворяются, причем растворение сопровождается большим выделением тепла. Хранить щелочи следует в герметически закрытых сосудах, железных или стеклянных, так как от соединения с углекислотой воздуха они приходят в негодность.

Приготавливать электролит нужно в чистой железной, чугунной, эмалированной или стеклянной посуде. Растворять щелочи следует небольшими частями во избежание высокой температуры электролита. Примерное количество щелочи для получения электролитов с различным удельным весом можно установить по табл. 28.

Весовые соотношения щелочи и воды в электролите с различным удельным весом

Состав и удельный вес электролита	Весовое соотношение щелочи и воды
Раствор едкого натра с удельным весом 1,17—1,19	$\frac{1}{5}$
Раствор едкого кали с удельным весом 1,19—1,21	$\frac{1}{3}$
Раствор едкого кали с удельным весом 1,26—1,3	$\frac{1}{2}$

При откалывании щелочи от больших кусков их необходимо прикрывать чистой тряпкой, чтобы отлетающие мелкие куски и пыль не попали на кожу или в глаза. Для большей безопасности нужно пользоваться защитными очками, а на руки надевать резиновые перчатки. При отсутствии перчаток куски щелочи брать железными щипцами.

Отвешенную щелочь нужно опускать в воду, налитую в сосуд, небольшими дозами; чтобы ускорить растворение щелочи, жидкость следует размешивать стеклянной или железной палочкой. Приготовленный электролит необходимо охладить до температуры окружающего воздуха (примерно до 15—20°С), измерить его удельный вес ареометром и довести до требуемого.

Следует помнить, что электролит — ядовитая жидкость, попадание ее на кожу вызывает нарывы. Места, пораженные электролитом, нужно промывать двухпроцентным раствором борной кислоты, а затем чистой водой.

В случае использования недистиллированной воды приготовленному электролиту нужно дать отстояться до полного осветления (от 6 до 12 часов). За это время на дно сосуда осаждается большая часть вредных примесей (кальций, железо, марганец и др.). Отстоявшийся электролит необходимо осторожно перелить в другой сосуд и затем уже заливать в аккумуляторы с помощью резиновой груши или воронки. Уровень электролита в аккумуляторах должен быть на 5—12 мм выше пластин; определяется уровень с помощью стеклянной трубочки. Электролит с температурой выше 30°С в аккумуляторы заливать нельзя (портится активная масса).

С течением времени электролит в аккумуляторах насыщается углекислотой CO_2 воздуха и резко повышает свое сопротивление.

§ 160. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ И СВОЙСТВА ЩЕЛОЧНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Электрические данные

Электродвижущая сила щелочных аккумуляторов очень незначительно зависит от удельного веса электролита. В среднем она равна 1,35 в.

Внутреннее сопротивление щелочных аккумуляторов примерно в 4—5 раз больше, чем свинцовых, при одинаковых размерах. Величина сопротивления зависит от размеров аккумулятора и лежит в пределах от тысячных до десятых долей ома.

Несмотря на постоянство удельного веса электролита в щелочных аккумуляторах, внутреннее сопротивление заряженного аккумулятора примерно в два раза меньше, чем разряженного. Объясняется это тем, что по мере разряда аккумулятора активные массы его пластин переходят в гидраты закисей металлов, которые плохо проводят электрический ток.

Величины начального и конечного разрядных напряжений аккумуляторов зависят от величины разрядного тока, который определяет собой внутреннее падение напряжения.

При нормальном разрядном токе начальное разрядное напряжение составляет 1,3 в, а конечное — 1,1 в. Нормальным разрядным током или током восьмичасового режима называется ток, при котором аккумулятор отдает гарантированную заводом емкость в течение 8 час. Величина нормального разрядного тока определяется из формулы

$$Q = I_p t_p,$$

откуда

$$I_p = \frac{Q}{8} \text{ ампер.} \quad (164)$$

Зарядные напряжения при заряде аккумуляторов нормальным зарядным током составляют: начальное 1,4 в, конечное 1,8 в. Величина нормального зарядного тока определяется по формуле

$$I_z = \frac{Q}{4} \text{ ампер.} \quad (165)$$

В формулах (164) и (165) буквой Q обозначена номинальная емкость аккумуляторов в ампер-часах.

Кривые зарядного напряжения щелочных аккумуляторов имеют примерно такой же вид, как и свинцовых (рис. 338).

Емкость щелочных аккумуляторов зависит от их размеров, которыми определяется количество активной массы в пласти-

нах. Гарантированной заводом емкостью щелочных аккумуляторов называется емкость, которую аккумулятор должен отдать при разряде его нормальным разрядным током до напряжения в 1,1 в при температуре среды 20—35° С.

В отличие от свинцовых аккумуляторов щелочные почти не изменяют своей емкости с увеличением разрядных токов выше нормального (очень незначительно уменьшают ее), и в этом одно из их ценных свойств. Однако емкость щелочных аккумуляторов понижается по мере загрязнения электролита углекислотой воздуха, поэтому требуется периодическая смена электролита (из-за увеличения внутреннего сопротивления конечное разрядное напряжение наступает раньше).

С уменьшением температуры емкость аккумуляторов уменьшается и начиная с температур ниже —5° С аккумулятор на каждый градус теряет примерно 1% емкости (если в электролит не добавлен едкий литий).

Свойства аккумуляторов

Одна из характерных особенностей щелочных аккумуляторов заключается в том, что у них саморазряд значительно меньше, чем у свинцовых; это объясняется химической нейтральностью электролита. Полностью заряженный аккумулятор подвергается саморазряду на 15—20% только в течение первого месяца хранения. При дальнейшем хранении саморазряд у аккумулятора очень незначителен, поэтому щелочные аккумуляторы можно хранить до года в разряженном состоянии без особого для них вреда.

Основные электрические и эксплуатационные данные некоторых типов аккумуляторов приводятся в табл. 29.

Таблица 29

Основные электрические и эксплуатационные данные некоторых щелочных аккумуляторов

Тип аккумулятора	Номинальная емкость, а-ч	Нормальный разрядный ток, а	Нормальный зарядный ток, а	Количество электролита в одном аккумуляторе, л	Вес одного аккумулятора, кг	Размеры, мм		
						ширина	длина	высота
АКН-2,25	2,25	0,28	0,56	0,042	0,33	20	45	132
НКН-10	10	1,25	2,5	0,12	0,74	31	80	123
НКН-45	45	5,65	11,25	0,45	2,72	53	105	213
НКН-100	100	12,5	25,0	1,20	6,50	70	128	349

§ 161. ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ ЩЕЛОЧНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Заряд аккумуляторов

Для щелочных аккумуляторов различают три вида зарядов: нормальный, ускоренный и усиленный.

Нормальный заряд сообщается всем аккумуляторам, находящимся в эксплуатации, после их нормального разряда, т. е. до положенного конечного напряжения.

Ускоренный заряд производится в более короткий срок (при недостатке времени) и сообщается также аккумуляторам, находящимся в эксплуатации.

Усиленный заряд производится в следующих случаях: 1) при заряде новых аккумуляторов, 2) после смены электролита, 3) после хранения аккумуляторов в сухом виде, 4) после каждого десятого нормального разряда для всех находящихся в эксплуатации аккумуляторов (или раз в месяц при несистематической работе аккумуляторов).

Рассмотрим каждый заряд в отдельности.

Усиленный заряд. Для сообщения усиленного заряда новым аккумуляторам (выпускаемым с завода без электролита), а также аккумуляторам, хранившимся в сухом виде, их заливают электролитом соответствующего удельного веса и оставляют на два часа для пропитывания активных масс пластин. Через два часа проверяют вольтметром напряжение каждого аккумулятора и уровень электролита (он несколько уменьшится). При отсутствии напряжения в каком-либо аккумуляторе его оставляют в покое еще на 10 час. и, если после этого напряжение не появится, аккумулятор заменяют другим.

После восстановления нормального уровня электролита аккумуляторы включают на заряд. Электрическая схема заряда аккумуляторов такая же, как и для свинцовых аккумуляторов (рис. 339). При подключении к зарядному источнику тока обязательно нужно соблюдать полярность.

Соппротивление балластного реостата определяется по формуле

$$R_6 = \frac{U_{\text{ист}} - n \cdot 1,8}{I_3}, \quad (166)$$

где $U_{\text{ист}}$ — напряжение зарядного источника;
 n — число однотипных аккумуляторов, последовательно соединенных для заряда;
1,8 — конечное зарядное напряжение на одном аккумуляторе в вольтах;
 I_3 — конечный зарядный ток.

Режим заряда следующий: первые 6 час. заряд ведется нормальным зарядным током и последующие 6 час. — половинным током. Новым аккумуляторам, а также аккумуляторам после сухого хранения такой заряд сообщается 2—3 раза подряд, причем после каждого заряда производится разряд нормальным разрядным током в течение 4 час. Затем аккумуляторам вновь сообщается усиленный заряд, после которого они могут быть сданы в эксплуатацию.

Для предохранения электролита от углекислоты воздуха в каждый аккумулятор вливают немного вазелинового масла или в крайнем случае керосина для получения на поверхности электролита защитного слоя толщиной в 1—2 мм. Защитный слой должны иметь все аккумуляторы, залитые электролитом.

Нормальный заряд. Перед включением батарей на нормальный заряд необходимо проверить уровень и удельный вес электролита, а также степень разряженности всех аккумуляторов, входящих в батарею. Удельный вес электролита сразу устанавливают нормальный, так как он не изменяется при заряде.

Степень разряженности определяют по разрядному напряжению, для чего аккумуляторную батарею включают под нагрузку нормальным разрядным током по схеме, изображенной на рис. 343. Аккумуляторный пробник (нагрузочная вилка) для щелочных аккумуляторов использовать нельзя, так как он рассчитан только для стартерных батарей.

По показанию вольтметра вычисляют напряжение на одном аккумуляторе:

$$U_p = \frac{U_6}{n},$$

где U_6 — разрядное напряжение на зажимах всей батареи;
 n — число аккумуляторов в батарее.

Зная разрядное напряжение на зажимах одного аккумулятора, определяют величину ΔU , т. е. понижение его напряжения по сравнению с начальным напряжением:

$$\Delta U = 1,3 - U_p,$$

где 1,3 — начальное разрядное напряжение аккумулятора.

После этого составляют пропорцию

$$0,2 : 100 = \Delta U : X,$$

где $0,2 = 1,3 - 1,1$ — величина полного понижения напряжения разряженного аккумулятора, пропорциональная его емкости;

X — степень разряженности батареи в процентах.

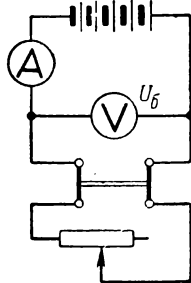


Рис. 343

Из пропорции определяют степень разряженности

$$X = \frac{100\Delta U}{0,2} \%.$$

После всей проделанной подготовки батарею включают на заряд по обычной схеме. Заряд производят нормальным зарядным током в течение 6 час. Если при определении степени разряженности батарея окажется разряженной не полностью, то конец заряда можно определить по постоянству конечного зарядного напряжения (1,8 в) на каждом аккумуляторе в течение 30—40 мин. Новым батареям первые 100—150 нормальных зарядов рекомендуется производить продолжительно — по 7 час.

Ускоренный заряд. От нормального заряда ускоренный отличается только своим режимом. Этот заряд первые 2,5 часа ведется двойным нормальным током, а следующие 1,5 часа — нормальным зарядным током. В общей сложности заряд длится 4 часа. Систематические ускоренные заряды приводят к понижению емкости аккумуляторов, поэтому к ним следует прибегать только в случае необходимости.

В процессе любого из трех зарядов необходимо соблюдать те же правила, что и при заряде свинцовых аккумуляторов (§ 155). По окончании заряда пробки нельзя закрывать в течение 3—4 час., а помещение необходимо вентилировать, так как у аккумуляторов продолжается выделение газов. Для быстрого удаления газов батарею следует включить в течение 15 мин. на разряд нормальным разрядным током.

Разряд аккумуляторов

При разряде аккумуляторов необходимо соблюдать следующие правила:

1) Не разряжать аккумуляторы ниже положенного конечного напряжения (§ 160).

2) При разряде большими токами (выше нормального) следить за тем, чтобы температура электролита была не выше 40°С.

3) Следить за уровнем электролита, особенно в жаркую погоду, и восстанавливать его доливкой дистиллированной воды.

Вместо дистиллированной воды можно применять речную, озерную или грунтовую воду, только ее нужно предварительно подщелочить. Для этого два объема воды смешивают с одним объемом готового электролита и после того, как раствор отстоится до полного осветления (через 6—12 час.), его сли-

вают в другой сосуд, из которого производится доливка электролита в аккумуляторы. Раствор следует приготовить заранее и хранить его в герметически закрытом стеклянном сосуде.

Уход за работающими аккумуляторами

Необходимо соблюдать следующие правила ухода за аккумуляторами, находящимися в эксплуатации:

1) Вести журнал на каждую батарею, как и для стартерных батарей.

2) Периодически удалять пыль и грязь, а также белые ползучие соли с наружных металлических частей. Соли сначала удаляют влажной тряпкой, а затем места, где они были, протирают насухо и смазывают техническим вазелином (соли интенсивно выступают при повышенном уровне электролита).

3) Следить за состоянием защитного слоя битумного лака на сосуде и восстанавливать его в случае нарушения.

4) Периодически проверять газовые отверстия в пробках (могут засориться от выделяющихся солей), а также следить за состоянием вентиляльных колец и сальников (пришедшие в негодность заменять запасными). Не смазывать кольца и сальники вазелином.

5) Один раз в год сменять электролит в аккумуляторах.

Перед сменой электролита батарею разрядить нормальным разрядным током до напряжения 1 в на каждом аккумуляторе. Вылить из аккумуляторов старый электролит, встряхивая при этом батарею для лучшего удаления грязи из сосудов. Затем несколько раз промыть аккумуляторы дистиллированной или подщелоченной водой. В промытые аккумуляторы залить свежий электролит с нужным удельным весом.

Через два часа удельный вес электролита проверить — он несколько понизится за счет воды, оставшейся в активных массах пластин. Для доведения удельного веса до нормального электролит удобнее опять вылить из всех аккумуляторов в один сосуд, довести его до нужного удельного веса и затем залить в аккумуляторы.

§ 162. ХРАНЕНИЕ ЩЕЛОЧНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ И НЕИСПРАВНОСТИ В НИХ

Хранение аккумуляторов

Щелочные аккумуляторы можно хранить в сухом виде и с электролитом, в полуразряженном или разряженном состоянии.

К хранению в сухом виде прибегают при сроке хранения более одного года; при меньшем сроке аккумуляторы хранят

с электролитом. В сухом виде аккумуляторы можно хранить до трех лет.

Для хранения в сухом виде батарею разряжают нормальным током до напряжения 1 в на каждом аккумуляторе. Затем из аккумулятора выливают электролит, плотно заворачивают пробки и смазывают все металлические части (межэлементные соединения, гайки, пробки) толстым слоем технического вазелина. При этом тщательно проверяют исправность вентильных колец и сальников пробок.

Промывать аккумуляторы водой после удаления из них электролита нельзя, так как оставшаяся вода может вызвать сильную коррозию пластин (электролит защищает пластины от коррозии).

Для хранения с электролитом батарея может быть либо разряженной, либо полуразряженной. При этом в аккумуляторы обязательно вводится защитный слой вазелинового масла или керосина, после чего пробки плотно заворачиваются (вентильные кольца и сальники должны быть исправны) и все металлические части смазываются вазелином. В процессе хранения необходимо удалять с металлических частей ползущие соли.

Для перевода батареи в эксплуатацию ей сообщается нормальный заряд или подзаряд до появления признаков конца заряда (т. е. до напряжения 1,8 в на каждом аккумуляторе).

Помещение для хранения аккумуляторов как в сухом виде, так и с электролитом должно быть сухим и вентилируемым, с температурой от 15 до 25° С.

Неисправности аккумуляторов

Основные неисправности щелочных аккумуляторов — это потеря емкости и вздутие сосудов.

Причинами потери емкости могут быть:

1. Поглощение электролитом кислотных паров или углекислоты из воздуха.

2. Систематический заряд слабыми токами (активные массы в аккумуляторе восстанавливаются при определенном потенциале, поэтому для восстановления емкости аккумулятора нужно дать усиленный заряд).

3. Внутреннее короткое замыкание вследствие разрыва пакетов с активной массой (редкая неисправность, в результате которой аккумулятор выходит из строя).

Вздутие сосудов может возникнуть от чрезмерного давления в них газов в случае засорения газовых отверстий в пробках. При значительном вздутии сосуда в батарее может про-

изойти короткое замыкание одного из аккумуляторов вследствие касания двух смежных сосудов.

Из вздутого сосуда нужно осторожно выпустить газы, медленно отвинчивая пробку. Если после этого стенки сосуда останутся деформированными, то их следует выпрямить, слегка сжав сосуд между двумя деревянными пластинами в тисках. Электролит из сосуда при этом предварительно выливается.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ XV

1. Что называется электролитами и каковы их свойства?
2. В чем заключается поляризация электродов при электролизе и каково ее практическое значение?
3. Из каких основных частей состоит гальванический элемент?
4. На чем основан принцип действия гальванических элементов?
5. Что называется емкостью гальванического элемента (аккумулятора) и от чего она зависит?
6. В чем конструктивное отличие водоналивного марганцево-цинкового элемента от сухого?
7. В чем состоит принцип маркировки гальванических элементов и батарей?
8. При каких условиях можно получить гарантированную заводом емкость от гальванического марганцево-цинкового элемента?
9. Каковы свойства сухих и водоналивных элементов?
10. Каковы правила заряда водоналивных элементов?
11. Каковы правила хранения гальванических марганцево-цинковых элементов?
12. Каковы способы и необходимые условия соединения гальванических элементов (аккумуляторов) в батареи?
13. Каковы особенности последовательного, параллельного и смешанного соединений элементов?
14. В чем отличие аккумуляторов от гальванического элемента и каков общий принцип работы аккумуляторов?
15. Как устроен свинцовый стартерный аккумулятор и что представляют собой активные массы пластин?
16. Как готовится электролит для свинцовых аккумуляторов?
17. Чему равны электродвижущая сила и разрядное напряжение свинцового аккумулятора?
18. От чего зависит емкость свинцового аккумулятора?
19. В чем заключается саморазряд свинцовых аккумуляторов и чем он вызывается?
20. Какие существуют виды зарядов для свинцовых аккумуляторов и каковы правила зарядов?
21. Каковы признаки конца заряда свинцового аккумулятора?
22. Как определяется степень разряженности стартерного аккумулятора?
23. Каковы правила разряда свинцовых аккумуляторов и ухода за ними?
24. Каковы правила хранения свинцовых стартерных батарей?
25. В чем основное преимущество щелочных аккумуляторов перед кислотными?
26. Как устроены щелочные кадмиево-никелевые аккумуляторы и что представляют собой активные массы пластин в аккумуляторе?
27. Как определить плюс щелочного аккумулятора нормальной конструкции?

28. В чем заключается принцип маркировки щелочных аккумуляторов и батарей?
29. Какие электролиты применяются для щелочных аккумуляторов?
30. Как готовится электролит для щелочных аккумуляторов?
31. Чему равны электродвижущая сила и разрядное напряжение щелочного аккумулятора?
32. Каковы свойства щелочного аккумулятора?
33. Какие существуют виды зарядов щелочных аккумуляторов и каковы правила зарядов?
34. Как определяется степень разряженности щелочного аккумулятора?
35. Каковы правила ухода за работающими щелочными аккумуляторами?
36. Каковы правила хранения щелочных аккумуляторов и неисправности в аккумуляторах?
-

ГЛАВА XVI

ВЫПРЯМИТЕЛИ

§ 163. НАЗНАЧЕНИЕ И ТИПЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Выпрямителями называются электрические приборы, обладающие односторонней проводимостью, т. е. пропускающие ток только в одном направлении. Выпрямители называют иногда электрическими вентилями (по аналогии с механическими, например, с велосипедными воздушными вентилями).

При помощи выпрямителей выпрямляют переменный ток в постоянный, откуда, собственно, и получили название сами приборы.

Применяемые в настоящее время выпрямители делятся на твердые и электровакуумные. В твердых выпрямителях односторонняя проводимость получается вследствие особых свойств полупроводников, а в электровакуумных выпрямителях — вследствие явления термоэлектронной эмиссии.

Из твердых выпрямителей широкое распространение получили меднозакисные (купроксные) и селеновые выпрямители, хотя за последнее время они начинают вытесняться германиевыми и кремниевыми выпрямителями, как более совершенными по своим электрическим и эксплуатационным данным. К числу электровакуумных выпрямителей, чаще всего применяемых на практике, относятся кенотроны.

Для понимания работы твердых выпрямителей необходимо предварительно ознакомиться со свойствами полупроводников.

§ 164. ПОЛУПРОВОДНИКИ И ИХ СВОЙСТВА

Полупроводниками принято называть вещества, главным образом кристаллической структуры, у которых значительно изменяется проводимость под действием тепла, света, электрических и магнитных полей, радиоактивного излучения, а также в результате добавления в них в виде примесей других веществ.

К числу полупроводников относятся окислы металлов, сернистые соединения, соединения с селеном. Типичные полупроводники — селен, германий, кремний, теллур.

Еще совсем недавно отдельные свойства полупроводников не находили в науке удовлетворительного объяснения, поэтому и сами полупроводники имели ограниченное применение в технике. Однако за последние 10—15 лет физикой сделаны очень большие успехи по изучению свойств различных полупроводников. Благодаря этим успехам границы применения полупроводников в технике значительно расширились и продолжают расширяться, а физические процессы, которые возникают в полупроводниках при использовании их для той или иной цели, в ряде случаев получили достаточное объяснение.

Полупроводники отличаются от проводников и диэлектриков прежде всего проводимостью. С этой величины и следует начать рассмотрение свойств полупроводников.

Все электроны любого вещества непрерывно движутся, поэтому обладают определенной кинетической энергией, или, как принято говорить, находятся в определенном энергетическом состоянии.

Для простоты рассуждений считают, что энергия всех электронов атома распределяется по так называемым **энергетическим уровням**. Более высоким уровням соответствуют и более высокие энергетические состояния электронов.

В нейтральном атоме электроны движутся по орбитам, имеющим разные диаметры. Чем меньше энергия электрона, тем он сильнее притягивается к ядру атома, а поэтому тем меньше диаметр его орбиты. Электроны, движущиеся по самым отдаленным орбитам, обладают наибольшей энергией и слабо притягиваются к ядру атома. Такие связанные с ядром электроны называют также внешними электронами.

В проводнике внешние электроны обладают значительной энергией, поэтому движутся они по очень удаленным орбитам и слишком слабо притягиваются к ядру. Стоит таким электронам сообщить даже незначительную по величине дополнительную энергию, как они легко покидают атом и становятся свободными. Эту дополнительную энергию электроны получают в результате теплового движения атомов при температурах, значительно отличающихся от абсолютного нуля, или под действием внешнего электрического поля, когда проводник подключается к источнику тока.

Таким образом, благодаря высокому энергетическому состоянию внешних электронов в проводнике практически всегда имеются свободные электроны, которые и обуславливают собой проводимость проводников. Такую проводимость, как известно, называют электронной.

Следует отметить, что вследствие идентичности атомов однородного проводника каждый из них, находясь в одинаковых условиях (при одинаковой температуре или в электрическом поле одного и того же источника тока), теряет одинаковое число внешних электронов, зависящее от структуры проводника. Поэтому все атомы остаются заряженными положительно равными по величине электрическими зарядами.

В диэлектриках внешние электроны обладают малой меньшей энергией, чем в проводниках, поэтому они движутся по сравнительно небольшим орбитам и сильно притягиваются к ядру атома. Дополнительная энергия, которую электроны могут получить в результате теплового движения атомов диэлектрика, уже далеко недостаточна, чтобы перевести их в свободное состояние. Из-за отсутствия свободных электронов диэлектрики практически не проводят электрический ток. Конечно, под действием очень сильного электрического поля внешние электроны можно вырвать с орбит, но это приведет к пробое диэлектрика.

Полупроводники занимают среднее положение между проводниками и диэлектриками в отношении энергии внешних электронов. Вследствие иного энергетического состояния внешние электроны в полупроводниках значительно слабее притягиваются к ядру атома, чем в диэлектриках, но все же сильнее, чем в проводниках. По этой причине любой полупроводник при температурах, близких к абсолютному нулю, практически не проводит ток, даже при значительных напряжениях источника тока, т. е. проявляет себя как диэлектрик. Однако по мере повышения температуры у полупроводника появляется проводимость, которая быстро увеличивается и при некоторой температуре даже превосходит проводимость хороших проводников. Объясняется это хаотическим характером теплового движения атомов. При таком движении отдельные атомы, как известно, неизбежно получают значительную по величине тепловую энергию, вполне достаточную для того, чтобы при столкновении с другими атомами выбить у них внешние электроны с орбит. В диэлектриках тепловой энергии подобных атомов недостаточно, чтобы выбить внешние электроны с орбит. С увеличением температуры частота и амплитуда колебания атомов возрастают, поэтому появляется все больше атомов с повышенным содержанием тепловой энергии, а следовательно, больше становится и свободных электронов в полупроводнике, т. е. проводимость увеличивается. С понижением температуры происходит обратный процесс.

В отличие от проводников величина проводимости у полупроводников определяется не только количеством свободных электронов (в этом и состоит основная разница между проводниками и полупроводниками).

Дело в том, что одновременно с переходом внешних электронов в свободное состояние в пространственной решетке полупроводника образуются и положительно заряженные атомы. В каждом атоме после ухода от него внешнего электрона появляется **свободный энергетический уровень**. Этот уровень в атоме условно называют **дыркой**. Внешне дырка проявляет себя положительным зарядом атома.

Из-за наличия дырок в полупроводниках возможно движение и связанных внешних электронов, т. е. тех электронов, которые остаются на орбитах остальных атомов. Такое движение электронов под действием электрического поля источника тока удобно рассматривать на кристаллической решетке полупроводника германия. В этом полупроводнике каждый атом связан одновременно с четырьмя соседними атомами при помощи своих четырех внешних электронов (рис. 344, а), используя, таким образом, для связи с одним атомом лишь один электрон.

На рис. 344, б условно изображены пять одних и тех же атомов германия в различные моменты времени (t_1, t_2, t_3, t_4), причем полярность источника постоянного тока по отношению к атомам все время остается одной и той же.

Пусть в момент времени t_1 дырка образовалась в первом атоме. Тогда под действием электрического поля источника связанный внешний электрон второго атома без особого труда перейдет на орбиту первого атома и заполнит в нем дырку. Однако с уходом электрона с орбиты второго атома (см. момент времени t_2) дырка возникнет в этом атоме, но и она с таким же успехом заполнится внешним электроном третьего атома (см. момент времени t_3). Дырка, которая возникает в третьем атоме, заполнится электроном четвертого атома и т. д. В результате, как видно из рис. 344, б, дырка перемещается вправо, в сторону минуса источника, а связанные

внешние электроны перемещаются поочередно влево, в сторону плюса источника.

Движение дырок в полупроводнике равносильно движению в нем положительных зарядов, хотя фактически движутся лишь связанные внешние электроны. Положительные заряды, как заключенные в ядрах атомов, конечно, не могут перемещаться вдоль полупроводника. Перемещаются лишь состояния атомов, ха-

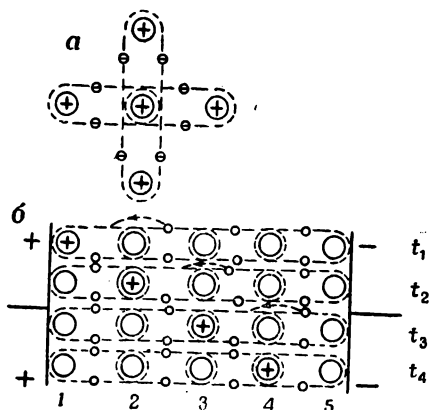


Рис. 344

рактеризуемые наличием в этих атомах свободных энергетических уровней.

Проводимость полупроводников, которая возникает у них в результате появления дырок, называют дырочной проводимостью или проводимостью типа p (от слова *positiv* — положительный); электронную же проводимость, которая возникает у полупроводников в результате появления свободных электронов, называют также проводимостью типа n (*negativ* — отрицательный).

Таким образом, химически чистый полупроводник обладает одновременно двумя проводимостями — электронной и дырочной.

В проводниках дырочная проводимость невозможна по той причине, что у них становятся свободными внешние электроны **всех** атомов, поэтому связанных электронов на орбитах не остается. Дырок в проводнике возникает очень много, но они не создают проводимости, так как отсутствуют связанные внешние электроны.

Зависимость сопротивления полупроводника от температуры графически изображена на рис. 345. Для сравнения такая же зависимость изображена и для проводника.

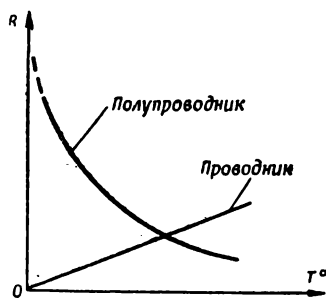


Рис. 345

§ 165. ЗАВИСИМОСТЬ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ОТ ПРИМЕСЕЙ

Установлено, что величина проводимости полупроводников очень сильно зависит от примесей. Так, если в германий добавить сурьму, то его электронная проводимость увеличится, а дырочная соответственно уменьшится. Наоборот, если в тот же германий добавить индий, то увеличится дырочная проводимость и соответственно уменьшится электронная. Это объясняется исключительно количеством внешних электронов у атомов примесей.

Атомы сурьмы имеют по пять внешних электронов. Для нормальной связи с атомами германия достаточно всего четырех электронов. Поэтому каждый атом сурьмы, введенный в германий, легко отдает один электрон в виде свободного, вследствие чего электронная проводимость германия увеличивается. Соответствующее уменьшение дырочной проводимости объясняется тем, что атомы сурьмы, становясь с уходом от них электронов положительно заряженными, сильнее удерживают своими положительными зарядами внешние электроны атомов германия на орбитах и не дают им переходить в сво-

бодное состояние под действием теплового движения (дырок в полупроводнике становится меньше).

Атомы индия имеют по три внешних электрона. Поэтому каждый атом индия присоединяет к себе по одному внешнему электрону от соседнего атома германия и этим осуществляет нормальную связь с четырьмя атомами германия. В результате в проводнике возникают дополнительные дырки и его дырочная проводимость увеличивается. Электронная же проводимость соответственно уменьшается, так как внешние электроны атомов германия частично переходят уже не в свободное состояние, а присоединяются атомами индия, которые при этом заряжаются отрицательно.

Чем больше вводится примеси в полупроводник, тем сильнее сказывается ее общее действие на проводимость полупроводника: один тип проводимости увеличивается, а другой соответственно уменьшается.

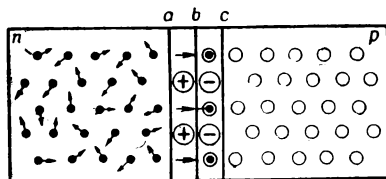
При значительном количестве примеси можно получить полупроводник, обладающий практически какой-либо одной проводимостью (типа n или p). К названиям таких полупроводников для указания типа их проводимости условились добавлять буквы p или n . Например, говорят p — германий, n — германий и т. п.

§ 166. ОДНОСТОРОННЯЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПРИГРАНИЧНОГО СЛОЯ ДВУХ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Если сложить вместе два полупроводника, обладающих различной проводимостью, например, p -германий и n -германий (рис. 346), то в приграничных слоях ab и bc полупроводников появятся равные по величине, но противоположные по знаку электрические заряды. Объясняется это тем, что свободные электроны n -германия под действием взаимных сил отталкивания частично перейдут в p -германий, заполнят ближайшие дырки и превратятся, таким образом, в связанные внешние электроны атомов.

Вследствие перехода электронов в слое ab n -германия станет проявляться суммарный заряд положительно заряженных атомов сурьмы, а в слое bc p -германия — суммарный заряд отрицательно заряженных атомов индия. Эти суммарные электрические заряды называют также объемными зарядами.

Переход электронов прекращается, когда силы их взаимного отталкивания уравниваются силами электрического поля объемных зарядов.



- Электрон (свободный).
- Дырка
- ⊙ Дырка, заполненная электроном

Рис. 346

Очень важно отметить, что из-за перехода части электронов из n -германия в p -германий приграничные слои ab и bc практически лишаются основных носителей электрических зарядов (слой ab лишается свободных электронов, а слой bc — дырок), поэтому сопротивление всего приграничного слоя ac значительно возрастает по сравнению с сопротивлением остальных частей полупроводников. Этот приграничный слой ac , обладающий повышенным сопротивлением, в теории полупроводников называют **запирающим слоем**.

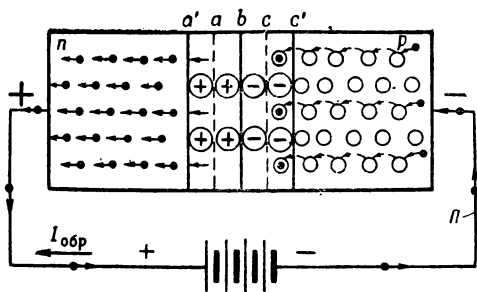


Рис. 347

Рассмотрим, что произойдет в полупроводниках, если их присоединить к источнику постоянного тока с соблюдением полярности, указанной на рис. 347.

Под действием сил электрического поля источника свободные электроны n -германия начнут перемещаться влево, отчего приграничный слой ab станет расширяться, а величина его объемного положительного заряда — возрастать.

Перемещению электронов источником тока будут препятствовать силы притяжения их объемным положительным зарядом.

Аналогичная картина будет происходить и в p -германии. Под действием сил электрического поля того же источника в p -германии начнут поступать по соединительному проводу Π свободные электроны, которые, перемещаясь от одной дырки к другой, заполняют дырки, расположенные по соседству с приграничным слоем bc . В результате слой станет расширяться, а его объемный отрицательный заряд возрастать.

Перемещению электронов в сторону приграничного слоя bc будут препятствовать силы отталкивания их объемным отрицательным зарядом.

В результате ширина запирающего слоя увеличится до $a'b'$ (до $10^{-5} - 10^{-6}$ см), его сопротивление еще больше возрастет и поэтому прохождение электрического тока через слой практически станет невозможным.

Начавшееся под действием источника тока движение свободных электронов по обе стороны от запирающего слоя быстро прекратится, как только силы электрического поля источника будут уравновешены силами взаимодействия объемных зарядов с электронами или точнее с их зарядами.

Однако в каждом полупроводнике, кроме основных носителей, имеется незначительное количество и неосновных

(в n -германии — дырки, в p -германии — свободные электроны). Поэтому очень небольшой ток по цепи все же будет проходить. Этот ток называется **обратным током** $I_{обр}$.

Если увеличивать напряжение на зажимах источника, создавая тем самым более сильное электрическое поле, то обратный ток сначала увеличивается незначительно. Затем при некотором напряжении обратный ток резко возрастает и запирающий слой пробивается. Напряжение источника тока, при котором происходит пробой запирающего слоя, называется **пробивным обратным напряжением** $U_{обр. пр.}$

При изменении полярности источника тока (рис. 348) физические процессы в полупроводниках протекают иначе.

Под действием источника тока свободные электроны n -германия начнут беспрепятственно перемещаться в сторону приграничного слоя $a'b$, быстро его заполнят и своими отрицательными зарядами вызовут нейтрализацию положительного объемного заряда. В данном случае перемещению электронов источником тока будут способствовать силы притяжения их объемным положительным зарядом.

Одновременно под действием того же источника тока связанные внешние электроны приграничного слоя bc' также беспрепятственно станут перемещаться от одной дырки к другой в сторону положительного зажима источника. Эти электроны быстро освободят приграничный слой bc' и этим вызовут нейтрализацию его объемного отрицательного заряда. Фактически заряд будет нейтрализован атомами p -германия, которые после ухода от них внешних электронов останутся заряженными положительно.

Перемещению связанных электронов в данном случае также будут способствовать силы отталкивания их отрицательным объемным зарядом.

В результате запирающий слой заполнится основными носителями и его сопротивление резко уменьшится (запирающий слой фактически исчезает), поэтому в цепи установится ток, соответствующий суммарному сопротивлению обоих полупроводников. Этот ток называется **прямым током** $I_{пр}$, и по

величине он во много раз превышает обратный ток.

Напряжение источника тока, вызывающее прямой ток, также называется **прямым напряжением** $U_{пр}$. В отличие от обратного пробивного напряжения оно очень небольшое.

Итак, два соприка-

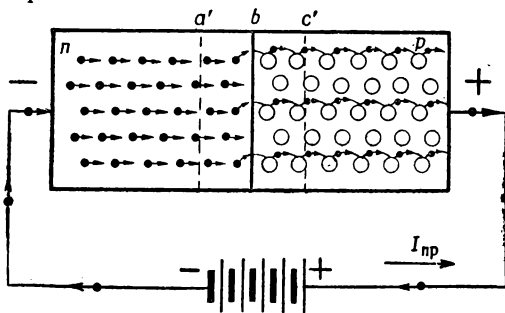


Рис. 348

сающихся полупроводника с различными проводимостями p и n обладают **односторонней проводимостью приграничного слоя**, т. е. практически пропускают ток только в одном направлении, а именно от полупроводника с дырочной проводимостью к полупроводнику с электронной проводимостью¹. Это свойство полупроводников и лежит в основе принципа действия всех существующих твердых выпрямителей.

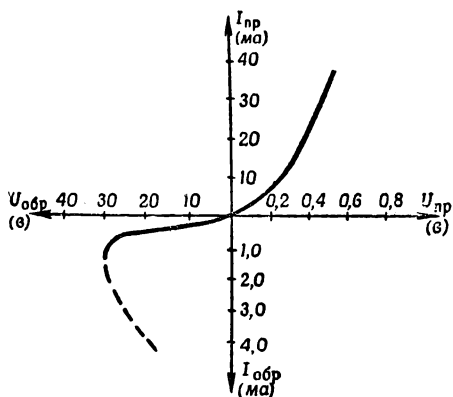


Рис. 349

Зависимость прямого $I_{пр}$ и обратного $I_{обр}$ токов от напряжения $U_{пр}$ и $U_{обр}$, приложенного к полупроводникам, называется их вольтамперной характеристикой (рис. 349).

§ 167. ТВЕРДЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Каждый твердый выпрямитель независимо от того, какие в нем используются полупроводники для получения односторонней проводимости, принято характеризовать следующими эксплуатационными данными: обратным рабочим напряжением $U_{обр.р}$; выпрямленным, или прямым током $I_{пр}$; допускаемой температурой $t_{доп}^{\circ}$ нагрева при работе; коэффициентом полезного действия.

Обратным рабочим напряжением называется такое напряжение постоянного тока, при котором обратный ток через выпрямитель получается очень незначительным и, следовательно, запирающий слой не подвергается опасности пробоя. По величине обратное рабочее напряжение примерно вдвое меньше обратного пробивного напряжения. В заводских данных обратное рабочее напряжение указывается в виде действующего значения переменного напряжения, которое можно подавать на выпрямитель для его нормальной работы.

Конструктивно твердые выпрямители устроены следующим образом.

Меднозакисный выпрямитель (рис. 350) представляет собой медный диск, покрытый с одной стороны тонким слоем окиси меди Cu_2O , выполняющей роль полупроводника с дырочной проводимостью.

¹ Электроны в цепи движутся, конечно, в противоположном направлении.

Слой получают путем прокаливания диска в воздухе при температуре 1040—1080° С и последующим быстрым охлаждением его в кипящей воде.

Как показали исследования, между слоем закиси меди и медью диска образуется промежуточный слой, несколько отличающийся по химическому составу от закиси меди. Этот слой фактически насыщен атомами меди (примесь), поэтому обладает электронной проводимостью и выполняет роль второго полупроводника.

Таким образом, запирающий слой в меднозакисном выпрямителе возникает на границе соприкосновения слоя закиси меди с промежуточным слоем.

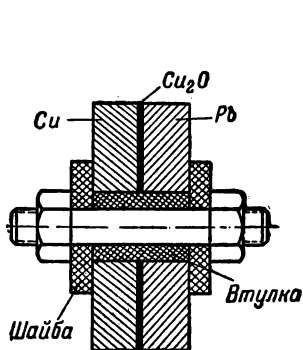


Рис. 350

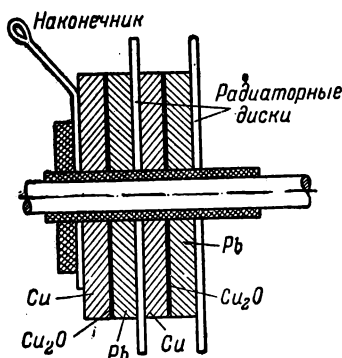


Рис. 351

При включении выпрямителя в цепь к слою закиси меди для создания хорошего контакта с помощью стяжного болта плотно прижимается свинцовый диск. От медного и свинцового дисков стяжной болт изолирован эбонитовой втулкой и шайбами. Медный и свинцовый диски служат электродами выпрямителя для включения его в цепь.

В зависимости от величины переменного напряжения выпрямители соединяют последовательно по несколько штук в столбики с таким расчетом, чтобы на каждом выпрямителе напряжение не превосходило значения обратного рабочего напряжения. В столбике выпрямители один от другого отделяются медными радиаторными дисками для лучшего охлаждения (рис. 351). Для включения в электрическую цепь столбики с обеих сторон имеют крайние контактные шайбы с наконечниками.

В селеновом выпрямителе полупроводником с дырочной проводимостью служит селен, а полупроводником с электронной проводимостью — селенистый кадмий, который обра-

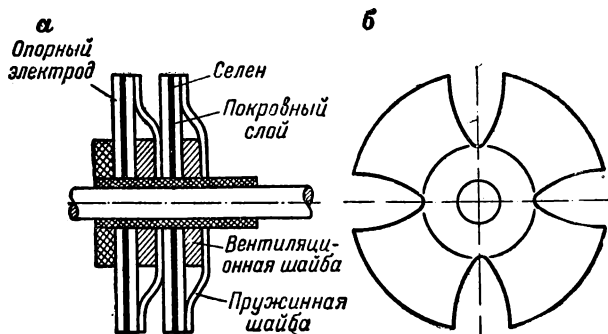


Рис. 352

зубется на наружной поверхности селена при наложении на него покровного слоя из сплава металлов кадмия (24%), висмута (50%) и олова (23%). Запирающий слой возникает на границе соприкосновения селенистого кадмия с селеном.

Конструктивно выпрямитель выполнен в виде стального никелированного диска (опорный электрод), на который с одной стороны наносится сначала тонкий слой селена, а затем покровный слой из сплава указанных металлов (рис. 352, а). К покровному слою стяжным болтом прижимается латунная пружинящая шайба (рис. 352 б), которая центральной своей частью опирается на вентиляционную контактную шайбу, предназначенную для улучшения охлаждения выпрямителя. Селеновые выпрямители также соединяются в столбики.

У германиевых выпрямителей — плоскостных диодов типа ДГ-Ц (рис. 353), выпускаемых нашей промышленностью, в качестве полупроводника с электронной проводимостью используется германий, который в виде пластинки 1 (рис. 353, а) припаявается к металлическому основанию 5, запрессованному в металлический корпус 6 выпрямителя. В свободную сторону пластинки (на рисунке в левую) в качестве примеси вводится индий,

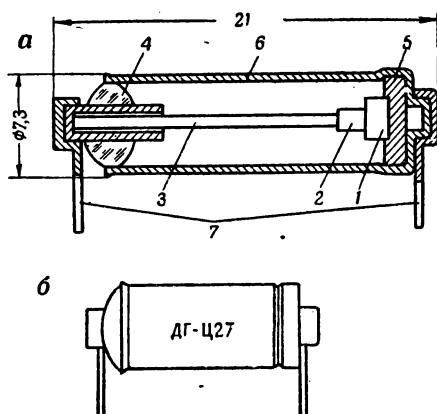


Рис. 353

благодаря чему в пластинке создается некоторой толщины слой с дырочной проводимостью.

На границе соприкосновения этого слоя с остальной частью германиевой пластинки и возникает запирающий слой.

К стороне пластинки, имеющей примеси атомов индия (на рис. 353, а показана пластинка 2 из индия), припаян токоведущий проводник 3, который через металлическую втулку, впаянную в стеклянный изолятор 4, соединяется с одним выводом 7 выпрямителя. Другой вывод выпрямителя соединен с корпусом.

Герметическое выполнение германиевого выпрямителя исключает попадание в него влаги, которая вызывает уменьшение сопротивления запирающего слоя, а следовательно, и увеличение обратного тока.

Меднозакисные и селеновые выпрямители для герметичности окрашиваются снаружи влагонепроницаемой краской.

Кремниевые выпрямители устроены аналогично германиевым. В настоящее время производство германиевых и кремниевых выпрямителей достаточно освоено и они выпускаются на прямые токи в сотни ампер при обратном рабочем напряжении до 600 в. Прямое напряжение при этом не превышает одного вольта.

По эксплуатационным данным селеновые выпрямители стоят выше меднозакисных.

Так, если у меднозакисных выпрямителей обратное напряжение равно 8—10 в, допускаемая температура нагрева не превышает 50° С, а к. п. д. — 70 %, то у селеновых выпрямителей обратное напряжение достигает 20 в, наибольшая температура нагрева до 70° С, а к. п. д. до 85 %.

При температурах нагрева выше указанных выпрямители пробиваются, т. е. теряют вентильное свойство и начинают проводить ток в обоих направлениях. Для получения нормальной температуры при работе выпрямителей плотность тока в них не должна превышать 0,02—0,05 а/см².

Выпрямители, выпускаемые нашими заводами, изготовляются на разную величину тока, поэтому имеют различный диаметр дисков.

Германиевые выпрямители значительно меньше меднозакисных и селеновых по размерам (при одинаковом прямом токе), более надежны в работе, у них несколько выше коэффициент полезного действия и очень большой срок службы (не менее 10000 ч).

В отношении обратного рабочего напряжения преимущество бесспорно на стороне германиевых выпрямителей. Максимальная температура нагрева германиевых выпрямителей не должна превышать 70° С.

Основные электрические данные некоторых типов твердых

выпрямителей, выпускаемых отечественной промышленностью, приводятся в табл. 30.

Таблица 30

Основные электрические данные некоторых типов твердых выпрямителей

Тип выпрямителя	Обратное рабочее напряжение, v	Выпрямленный ток, a	Примечание
Меднозакисные выпрямители			
ВК-103	12	1,2	Диаметр диска 40 мм
ВК-126	8	2,4	То же
ВК-133	7	0,8	"
Селеновые выпрямители			
ВС-18-12	18	0,075	Диаметр диска 18 мм
ВС-35-27	18	0,3	Диаметр диска 35 мм
Германиевые выпрямители			
ДГ-Ц-21	50	0,3	Указаны максимальные значения обратного рабочего напряжения
ДГ-Ц-27	400	0,1	

На электрических схемах твердые выпрямители изображаются так, как показано на рис. 354, *a*.

Если твердый выпрямитель включить последовательно с каким-либо приемником постоянного тока, например реостатом (рис. 354, *б*), под переменное напряжение, то он будет пропускать ток только в течение одного полупериода, когда его электроды будут иметь необходимую полярность, т. е. плюс (+) к полупроводнику. График выпрямленного тока показан на рис. 354, *в*. Такое выпрямление переменного тока называется однополупериодным выпрямлением, так как при нем используется только одна полувольтна синусоидального напряжения в течение полупериода.

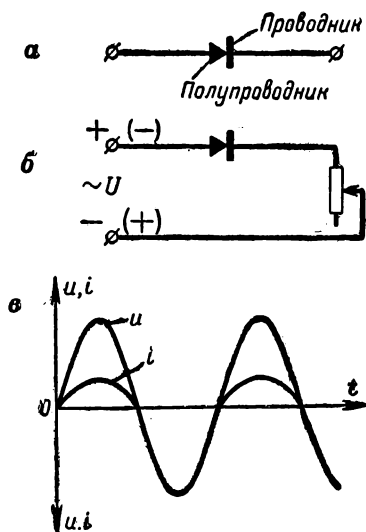


рис. 354

Для использования обеих полувольт обычно применяется мостовая схема включения выпрямителей (рис. 355, а). По этой схеме в течение первого полупериода (плюс слева) ток проходит через выпрямитель 1, приемник постоянного тока R_n и выпрямитель 2, а в течение второго полупериода — через выпрямитель 3, приемник R_n и выпрямитель 4. График выпрямленного тока показан на рис. 355, б. Такое выпрямление называется двухполупериодным.

Твердые выпрямители на практике часто применяются для заряда аккумуляторов, для возбуждения синхронных генераторов, для измерения переменного напряжения в комбинированных электрических измерительных приборах, а также для

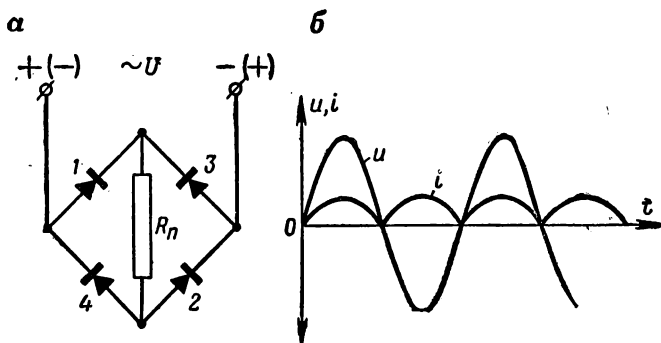


Рис. 355

питания постоянным током отдельных элементов электрических цепей специальных приборов и установок.

По сравнению с электровакуумными выпрямителями, имеющими обычно стеклянные баллоны, твердые выпрямители более надежны в работе во всякого рода передвижных установках и приборах.

§ 168. КЕНОТРОНЫ

Кенотроны относятся к числу электронных ламп, т. е. таких электровакуумных приборов, в которых используется только явление термоэлектронной эмиссии. Заключается оно в том, что твердые проводники, нагретые до определенной температуры (различной для разных проводников), начинают излучать свободные электроны. Объясняется это тем, что в результате нагрева проводников скорости отдельных электронов, а следовательно, и кинетическая энергия при их тепловом движении настолько повышаются, что они преодолевают силы притяжения положительно заряженных атомов и вылетают за пределы проводника. Энергия, которую при этом расходуют электроны, называется энергией выхода. Благодаря

термоэлектронной эмиссии кенотроны имеют одностороннюю проводимость. Внешний вид кенотрона показан на рис. 356.

Кенотрон состоит из стеклянного баллона и двух впаянных в него электродов — анода и катода. Путем откачки воздуха в баллоне создается высокий вакуум — порядка 10^{-9} атмосфер.

Катод делают обычно из вольфрамовой проволоки, которую для улучшения эмиссии и уменьшения температуры накала покрывают очень тонким слоем другого металла (бария,

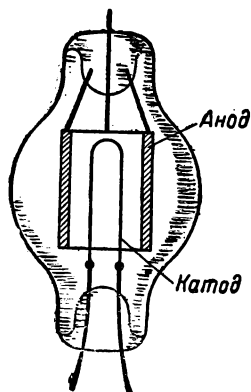


Рис. 356

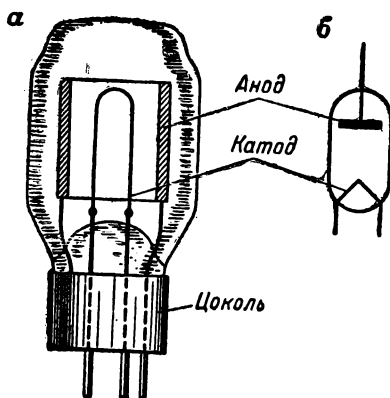


Рис. 357

тория или кальция), обладающего высокой эмиссией. Такие катоды называются активированными. Нормальная температура накала у активированных катодов $900\text{--}1100^\circ\text{C}$ (у вольфрамовых катодов $2200\text{--}2500^\circ\text{C}$).

Анод имеет форму полого цилиндра, охватывающего катод по всей его длине (на рис. 356 анод дан в разрезе). Аноды при работе кенотронов также довольно сильно нагреваются, поэтому их изготавливают из тугоплавких металлов таких, как молибден, никель или тантал.

У низковольтных кенотронов выводы от электродов делают через нижнюю часть лампы, называемую цоколем (рис. 357, а), а у высоковольтных — через противоположные стороны баллона (рис. 356). В электрических схемах кенотрон изображается так, как показано на рис. 357, б.

Физические процессы, которые происходят в кенотроне, заключаются в следующем.

При нагреве катода (от специального трансформатора накала) вокруг него создается облачко излученных электронов (рис. 358), образующих так называемый **объемный электрический заряд** в кенотроне. Объемный заряд при некоторой его величине препятствует дальнейшему выходу электронов

(отталкивает их), и эмиссия прекращается. Расположение электронов вблизи от катода объясняется притяжением их положительно заряженными атомами, которые остаются в катоде.

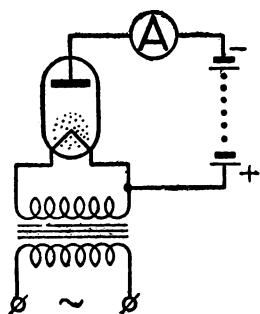


Рис. 358

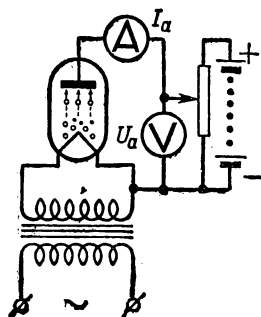


Рис. 359

Если кенотрон с нагретым катодом включить под напряжение источника постоянного тока, например аккумуляторной батареи (рис. 358), подав минус на анод, а плюс на катод, то никакого тока в цепи не будет даже при очень высоком (в сотни вольт) напряжении. Объясняется это тем, что электрическое поле, возникающее между электродами, отбрасывает излученные электроны обратно на катод и этим самым создает непроводящую среду в баллоне. Стоит только изменить полярность на электродах, т. е. на анод подать плюс, а на катод минус (рис. 359), как, даже при незначительных напряжениях (подаваемых по схеме потенциометра на рис. 359), в цепи появится небольшой электрический ток (порядка миллиампер). По мере повышения напряжения ток в цепи также будет возрастать.

Таким образом, кенотрон обладает односторонней проводимостью, поэтому может быть использован для выпрямления переменного тока.

По схеме, изображенной на рис. 359, можно снять данные для построения вольтамперной характеристики кенотрона, т. е. кривой зависимости тока в цепи лампы от приложенного к ней напряжения. Для этого постепенно (от нуля) повышают напряжение U_a и через каждые 5—10 в записывают ток I_a в цепи, по полученным данным строят характеристику (рис. 360). Ток, проходящий через кенотрон, называют анодным током, а напряжение, подаваемое на электроды,— анодным напряже-

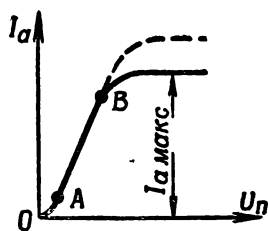


Рис. 360

нием. Это напряжение при работе кенотрона выпрямителем представляет собой внутреннее падение напряжения в нем.

Внешний вид вольтамперной характеристики кенотрона объясняется действием объемного заряда. При малых значениях анодного напряжения (до точки *A*) объемный заряд хотя и уменьшается (поскольку на крайние электроны этого заряда начинает сильнее действовать анод, чем положительно заряженные атомы катода), но незначительно, поэтому он продолжает задерживать эмиссию катода. По мере повышения анодного напряжения объемный заряд становится все меньше и меньше, поэтому условия для эмиссии облегчаются и анодный ток растет быстрее, пропорционально анодному напряжению (прямолинейный участок характеристики *AB*).

При некотором значении анодного напряжения объемный заряд полностью устраняется (все электроны, излучаемые катодом, сразу притягиваются к аноду), а катод дает полную эмиссию при данном накале, поэтому дальнейший рост анодного тока практически прекращается, несмотря на повышение анодного напряжения.

Наибольший ток, устанавливающийся в цепи, называется током насыщения ($I_{a \text{ макс}}$). Повышение этого тока (пунктирная кривая) возможно только при увеличении температуры накала, но это ведет к быстрому разрушению катода.

С помощью кенотронов можно производить как однополупериодное, так и двухполупериодное выпрямление переменного тока.

На рис. 361, *a* изображена схема однополупериодного выпрямления. Катод питается от дополнительной вторичной обмотки трансформатора *Tr*, с помощью которого к кенотрону подводится переменное напряжение. Для устранения перерывов выпрямленного тока (рис. 361, *б*) параллельно приемнику постоянного тока R_n включают конденсатор *C*. Этот конденсатор в течение проводящей части периода (когда кенотрон работает) заряжается, а в течение непроводящей части разряжается на приемник R_n и таким образом поддерживает в нем ток. График суммарного тока в цепи приемника постоянного тока на рис. 361, *б* показан пунктирной линией. У кенотрона катод служит плюсом для приемника постоянного тока.

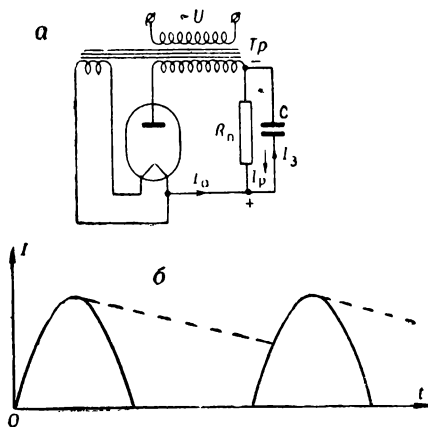


Рис. 361

Схема двухполупериодного выпрямления приведена на рис. 362, *а*. Как видно из рисунка, на каждый кенотрон подается только половина напряжения (действующего значения) от вторичной обмотки трансформатора Tr . Средняя точка O в обмотке является точкой нулевого потенциала. В отношении этой точки положительные и отрицательные потенциалы на зажимах обмотки A и B чередуются через каждый полупериод, поэтому и кенотроны работают поочередно. При положительном потенциале на одном из зажимов, например левом A , работает левый анод. При этом ток проходит по контуру: зажим обмотки A , анод, катод, приемник постоянного тока R_n , средняя точка обмотки трансформатора O , зажим A . Аналогично ток проходит и при работе правого анода.

Для уменьшения пульсации выпрямленного тока (рис. 362, *б*) в схему включают электрический фильтр, состоящий из катушки L с железным сердечником, которая включается последовательно с приемником R_n , и двух конденсаторов, включаемых параллельно с приемником. Катушка задерживает уменьшение выпрямленного тока до нуля (пунктир на рис. 362, *б*), поэтому пульсация тока несколько уменьшается. Конденсаторы еще больше сглаживают пульсацию (заряжаются при повышении переменного напряжения на анодах и разряжаются через приемник при понижении этого напряжения). В результате выпрямленный ток $I_{выпр}$ (рис. 362, *б*) изменяется очень незначительно.

Для упрощения схемы при выпрямлении сравнительно невысоких напряжений часто применяют кенотрон с двумя анодами при одном общем катоде (рис. 363, *а*). В этом случае схема двухполупериодного выпрямления принимает вид, показанный на рис. 363, *б*.

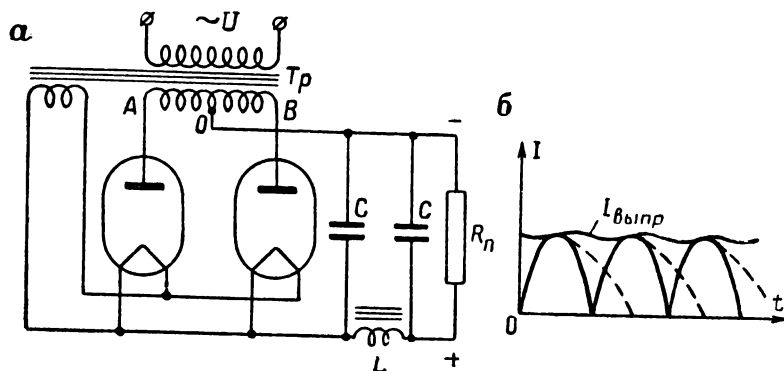


Рис. 362

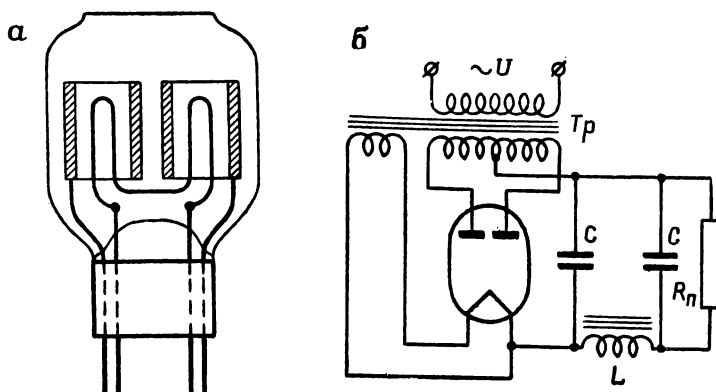


Рис. 363

Основные электрические данные некоторых типов кенотронов отечественного производства с двойными анодами приводятся в табл. 31.

Таблица 31

Основные электрические данные некоторых типов кенотронов

Тип кенотрона	Напряжение накала, в	Ток накала, а	Наибольший ток анода, ма	Наибольшее анодное напряжение, в
2В-150	3,6	0,45	150	750
2В-400	4,0	1,95	400	1200

По сравнению с твердыми выпрямителями кенотроны обладают очень высоким внутренним падением напряжения при максимальном анодном токе. Внутреннее падение напряжения — это собственно прямое напряжение выпрямителей. Если у твердых выпрямителей прямое напряжение составляет доли процента обратного рабочего напряжения, то у кенотронов оно достигает нескольких десятков и даже сотен вольт при сравнительно небольших анодных токах (порядка миллиампер). Такое большое внутреннее падение напряжения объясняется действием объемного заряда в кенотроне.

Однако кенотроны позволяют надежно выпрямлять высокие напряжения переменного тока, и в этом их преимущество перед твердыми выпрямителями. На практике имеются специальные высоковольтные кенотроны, которые выпрямляют ток при напряжении до 400 кВ. Вследствие значительного внутреннего падения напряжения к. п. д. кенотронов ниже, чем твердых выпрямителей.

Кенотроны чаще всего применяются в устройствах, требующих небольших значений выпрямленного тока (в радиоприемниках, радиотехнических устройствах и т. п.).

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ XVI

1. Что называется выпрямителем и какие бывают выпрямители?
 2. В чем заключаются физические процессы при работе твердого выпрямителя?
 3. Что называется обратным напряжением в твердом выпрямителе?
 4. Каковы устройство и свойства купроксного и селенового выпрямителей?
 5. Каковы электрические схемы твердых выпрямителей для однополупериодного и двухполупериодного выпрямления переменного тока?
 6. В каких случаях применяются твердые выпрямители на практике?
 7. Что называется кенотроном и на чем основан принцип его работы?
 8. Как устроен кенотрон?
 9. Опишите физические процессы, происходящие при работе кенотрона.
 10. Что называется током насыщения в кенотроне и от чего зависит его величина?
 11. Опишите электрическую схему кенотрона для однополупериодного выпрямления переменного тока.
 12. Чем отличаются полупроводники от проводников и диэлектриков?
 13. В чем заключается физический смысл дырочной проводимости полупроводников?
 14. Объясните возникновение запирающего слоя на границе соприкосновения двух полупроводников.
 15. Опишите физические процессы в твердом выпрямителе при прохождении через него прямого и обратного токов.
-

ГЛАВА XVII

СИНХРОННЫЕ ИНДИКАТОРНЫЕ ПЕРЕДАЧИ

§ 169. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧАХ

Согласованная работа отдельных механизмов той или иной машины достигается благодаря механической связи между ними в виде зубчатых, фрикционных и других передач. Однако такая связь между механизмами возможна и рациональна лишь в том случае, когда эти механизмы сравнительно недалеко удалены друг от друга и когда их взаимное расположение не изменяется в пространстве. При значительных расстояниях между механизмами или целыми агрегатами, входящими в состав какого-либо сложного устройства или системы, применяются синхронные электрические передачи.

С технической точки зрения синхронной передачей называется устройство, которое позволяет непрерывно и практически мгновенно передавать на расстояния данные, необходимые для согласованной работы механизмов, входящих в систему. В большинстве случаев синхронные передачи используются для передачи угловых величин, которые определяют собой требуемое положение валов механизмов в пространстве.

Следует различать два вида синхронных передач: силовые и индикаторные.

Силовые синхронные передачи самостоятельно осуществляют поворот валов обслуживаемых ими исполнительных механизмов на необходимые углы (без участия человека); индикаторные же передачи лишь указывают эти углы для механизмов (обычно стрелкой); отработка углов при этом производится человеком или автоматически специальным электрическим двигателем с помощью так называемого следящего устройства (гл. XVIII).

В данной главе рассматриваются лишь индикаторные синхронные передачи. Силовые передачи громоздки (особенно при значительных тормозящих моментах в исполнительных механизмах) и применяются редко.

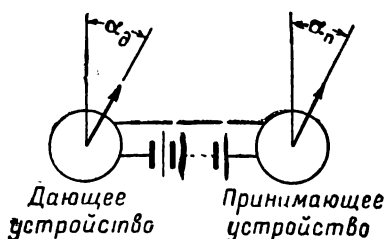


Рис. 364

В состав каждой индикаторной передачи входят следующие элементы: 1) дающее устройство, 2) принимающее устройство, 3) соединительные провода и 4) источник тока.

Вал дающего устройства либо механически соединяется с управляющим механизмом, который задает углы исполнительным механизмам, либо поворачивается человеком на

нужные углы. На валу принимающего устройства чаще всего имеется указательная стрелка, которая отклоняется на угол, передаваемый дающим устройством (рис. 364). В некоторых синхронных передачах сам угол не указывается, а лишь подается сигнал тем или иным индикаторам о наличии угла (с отработкой угла сигнал исчезает).

К синхронным передачам предъявляется одно основное требование — обеспечить высокую точность передачи углов или так называемое синфазное вращение валов дающего и принимающего устройств. Разность между углами, на которые поворачиваются валы дающего и принимающего устройств ($\alpha_d - \alpha_n = \theta$), называется углом ошибки синхронной передачи. Этот угол зависит от ряда причин и у различных передач лежит в пределах от $\pm 0,75$ до $\pm 5,0^\circ$.

Необходимо различать синхронное и синфазное вращение двух валов. При синхронном вращении валы вращаются в любой момент времени либо с одинаковыми, либо с пропорциональными скоростями. При синфазном же вращении каждому положению вала дающего устройства соответствует лишь одно определенное положение вала принимающего устройства. Таким образом, всякое синфазное вращение есть синхронное вращение (но не наоборот).

Синхронные индикаторные передачи могут выполняться для работы как на постоянном, так и на переменном токе. По устройству передачи делятся на потенциометрические, электромагнитные и индукционные.

§ 170. ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКАЯ СИНХРОННАЯ ПЕРЕДАЧА

Синхронная передача на потенциометрах — самая простая по устройству, и в этом ее преимущество перед другими передачами. Электрическая схема передачи с цилиндрическими потенциометрами изображена на рис. 365.

В состав синхронной передачи входят два потенциометра — дающий и принимающий, индикатор в виде чувствительного

вольтметра с нулем посредине шкалы, соединительные провода и источник тока.

Перемещение ползунков у цилиндрических потенциометров осуществляется с помощью винтовой пары. Вольтметр располагается у принимающего потенциометра.

Принцип работы передачи основан на наличии точек одинаковых потенциалов в параллельных ветвях, образуемых потенциометрами. Когда ползунки обоих потенциометров касаются таких точек, разность потенциалов между ними равна нулю и вольтметр ничего не показывает. При этом валики, перемещающие ползунки дающего и принимающего потенциометров, должны занимать синфазное положение.

Угловые величины передаются следующим образом. При перемещении ползунка дающего потенциометра в ту или иную сторону от точки, соответствующей синфазному положению валиков, между ползунками возникает разность потенциалов $\Delta U = U_d - U_n$ того или иного знака (в зависимости от соотношения между потенциалами U_d и U_n). Под действием этой разности потенциалов через вольтметр начинает проходить ток, отклоняя указательную стрелку на тот или иной угол. Отклонение стрелки вольтметра служит сигналом о том, что по синхронной передаче начали поступать данные.

Поворачивая маховичок принимающего потенциометра в такую сторону, чтобы угол отклонения стрелки вольтметра уменьшался до нуля, отрабатывают величину угла, передаваемого дающим потенциометром. Если валик ползунка принимающего потенциометра соединить с валом исполнительного механизма, то этот вал также повернется на передаваемый угол.

Величина угла ошибки θ в данной синхронной передаче зависит от чувствительности вольтметра, от расстояния между потенциометрами, а также от того, насколько одинаково выполнены оба потенциометра. Чем чувствительнее вольтметр, тем меньше разность потенциалов $\Delta U = U_d - U_n$, на которую он реагирует, а следовательно, тем меньше получается и угол ошибки $\theta = \alpha_d - \alpha_n$.

При значительном расстоянии между потенциометрами напряжение на зажимах принимающего потенциометра получается несколько меньше, чем у дающего, за счет падения напряжения в проводах. Поэтому для получения точек одинакового потенциала ползунков при-

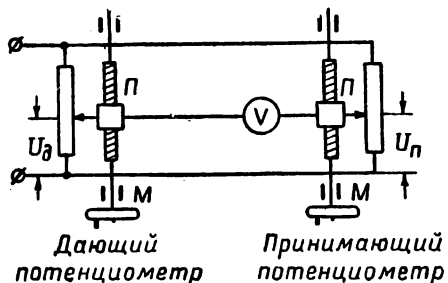


Рис. 365

нимающего потенциометра необходимо перемещать несколько дальше, чем ползунок дающего потенциометра. Разное же положение ползунков при нулевом показании вольтметра приводит к ошибке в передаче угла.

Для уменьшения угла ошибки оба потенциометра должны быть по возможности одинаковыми по размерам и электрическим данным, иначе ползунки их будут занимать разные положения при нулевом показании вольтметра.

Потенциометрическая синхронная передача с тщательно изготовленными высокоомными потенциометрами обеспечивает большую точность передачи углов, поэтому довольно часто применяется в специальных устройствах.

§ 171. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИНХРОННАЯ ПЕРЕДАЧА

Электрическая схема электромагнитной синхронной передачи изображена на рис. 366. Дающим устройством в ней служит специальный ключ-коммутатор, который при своем вращении преобразует постоянный ток в трехфазный (ступенчатый). Принимающим устройством является синхронный реактивный двигатель, у которого фазы статора соединены в звезду. Ротор выполнен в виде двухполюсного постоянного магнита.

Принцип работы передачи заключается в том, что при вращении дающего ключа в статоре двигателя создается магнитное поле, которое вращается с такой же скоростью, как и дающий ключ. Это поле, взаимодействуя с полюсами ротора, заставляет его вращаться синхронно.

Преобразование постоянного тока в трехфазный достигается особым устройством дающего ключа (рис. 367, а). Ключ этот состоит из двух одинаковых частей (рис. 367, б),

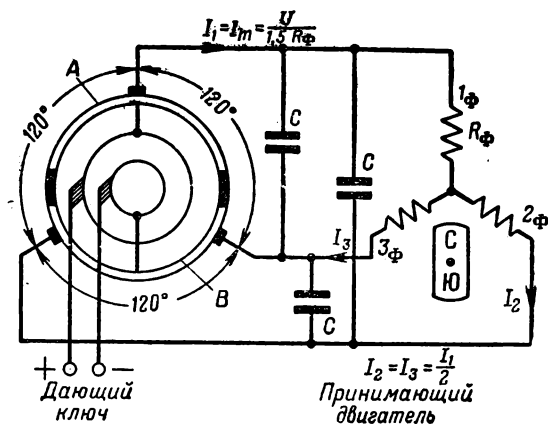


Рис. 366

разделенных изоляцией, которая по поверхности ключа охватывается дугой в 30° . Постоянный ток по двум щеткам подводится к крайним сторонам ключа, которые в схеме синхронной передачи (рис. 366) условно изображены в виде двух концентрических контактных колец, соединенных с дугами *A* и *B*. В фазы статора преобра-

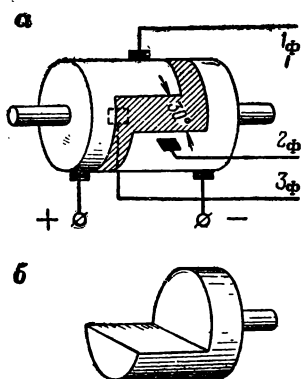


Рис. 367

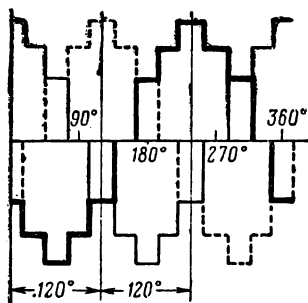


Рис. 368

зованный ток подается по трем щеткам, расположенным в средней части поверхности ключа и сдвинутым на 120° . Благодаря такому устройству ключа при его повороте на каждые 30° происходит переключение фаз статора, в результате чего токи в фазах изменяются по величине и по направлению.

Графики токов в фазах статора имеют вид ступенчатых синусоид, сдвинутых одна относительно другой на 120° (рис. 368). Полный цикл изменений токов происходит за один оборот ключа, поэтому частота трехфазного тока может быть определена по формуле

$$f = \frac{n_k}{60},$$

где n_k — число оборотов ключа в минуту.

Так как синхронный двигатель выполняется на два полюса ($p = 1$), то число оборотов вращающегося магнитного поля статора

$$n_{ст} = \frac{60f}{1} \text{ обороты } \cdot \text{ минута }.$$

Подставив в это равенство значение частоты $f = \frac{n_k}{60}$, получим

$$n_{ст} = \frac{60n_k}{60} = n_k.$$

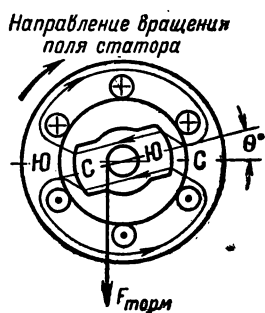


Рис. 369

Таким образом, поле статора и дающий ключ вращаются с одинаковой скоростью, поэтому с такой же скоростью вращается и ротор двигателя, увлекаемый полем.

В данной передаче ротор не соединяется с валом исполнительного механизма, а указывает (стрелкой) лишь передаваемый угол. Поворот механизма осуществляется ручным приводом до совмещения конца стрелки ротора с указателем (или индексом), укрепленным на валу исполнительного механизма.

Угол ошибки в передаче зависит главным образом от тормозящего момента, или тормозящего усилия $F_{\text{торм}}$ (рис. 369), приложенного к валу ротора. Чем больше тормозящий момент, тем больше угол θ отставания ротора от синфазного положения (положения, при котором его ось совпадает с осью вращающегося магнитного поля статора), поэтому тем больше получается угол ошибки.

В индикаторных синхронных передачах тормозящее усилие обуславливается трением в шарикоподшипниках. Величина этого усилия незначительна, благодаря чему и угол ошибки бывает сравнительно небольшой.

Недостаток электромагнитной синхронной передачи заключается в том, что она является импульсной передачей, т.е. такой, которая передает углы не непрерывно, а импульсами, через каждые 30° , вследствие чего и ротор поворачивается на соответствующие углы скачкообразно. Импульсный характер передачи ограничивает ее применение на практике.

§ 172. ИНДУКЦИОННАЯ СИНХРОННАЯ ПЕРЕДАЧА

Индукционная синхронная передача имеет то преимущество перед рассмотренными передачами, что она обеспечивает плавную и непрерывную передачу углов.

Свое название индукционной эта передача получила потому, что в качестве принимающих и дающих устройств в ней используются небольшие асинхронные двигатели с фазным ротором, которые называются также индукционными двигателями (энергия ротору передается путем электромагнитной индукции).

При работе в синхронной передаче указанные двигатели обладают свойством самосинхронизации, поэтому их в данном случае называют сельсинами или самосинами (что означает самосинхронизирующиеся). Самосинхронизация заключается в том, что после включения тока в передачу ротор

принимającego двигателя самостоятельно занимает синфазное положение.

По конструкции сельсины несколько отличаются от обычных асинхронных двигателей с фазным ротором.

В современных индукционных передачах применяют два типа сельсинов: сельсин с однофазным статором и трехфазным ротором и сельсин с трехфазным статором и однофазным ротором.

У сельсинов первого типа статор имеет два явно выраженных полюса (аналогично двухполюсному индуктору машины постоянного тока (рис. 370, а). Намагничивающие катушки полюсов соединяются последовательно и питаются однофазным током от источника синхронной передачи.

Для уменьшения вихревых токов железо статора и полюсы набираются из листовой динамной стали. Корпус статора делается из алюминия, и это исключает ответвление через него магнитного потока, создаваемого статорной обмоткой.

Ротор сельсина от ротора обычного асинхронного двигателя отличается лишь тем, что имеет косые пазы для укладки фазных обмоток (рис. 370, б). Такие пазы предназначены для того, чтобы устранить «прилипание» ротора к статору при работе сельсина. «Прилипание» возникает при прямых пазах на роторе под действием вредных магнитных потоков (рис. 371), препятствующих вращению ротора. Эти потоки создаются токами одного направления, возникающими в статорной обмотке и в расположенной вблизи от нее фазе ротора. Одинаковое направление токов в обмотках объясняется тем, что угол сдвига фаз между ними менее 180° (рис. 281). При таком угле токи в обмотках дважды за период в течение небольшого промежутка времени получают одинаковое направление. При прямых пазах на роторе вредные потоки проходят по всей активной длине статора и ротора, а в случае косых пазов эти потоки значительно ослабляются и тем самым исключается возможность «прилипания» ротора к статору.

Обмотки ротора соединяются в звезду, а свободными концами припаиваются к контактным кольцам (рис. 370). Щетки колец имеют выводные проводники к зажимам клеммного

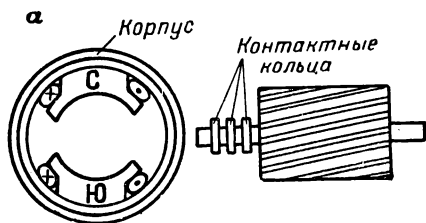


Рис. 370

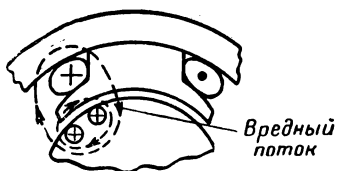


Рис. 371

щитка сельсина. На этот щиток к двум его зажимам выведены и концы статорной обмотки. Щиток укреплен на боковом подшипниковом щите со стороны колец ротора.

У сельсинов второго типа статор выполнен, как у обычного асинхронного двигателя, т. е. имеет три фазы, соединенные в звезду. Для устранения «прилипания» ротора пазы в железе статора сделаны косыми.

Ротор имеет два явно выраженных полюса и одну намагничивающую обмотку; концы обмотки припаяны к двум контактным кольцам. Через кольца по щеткам и выводным проводникам в обмотку ротора от источника синхронной передачи поступает однофазный ток. Для уменьшения вихревых токов ротор набран из листовой динамной стали.

Выводы всех обмоток сельсина смонтированы на клеммном щитке так же, как и у сельсина первого типа.

Сельсины второго типа применяются обычно в качестве принимающих устройств, так как у этих сельсинов благодаря меньшему количеству контактных колец собственный тормозящий момент получается значительно меньше, чем у сельсинов первого типа (меньший тормозящий момент приводит и к меньшему углу ошибки в передаче). Сельсины первого типа используются главным образом как дающие устройства, так как в этом случае тормозящий момент не оказывает влияния на угол ошибки.

Чтобы понять работу индукционной синхронной передачи, рассмотрим сначала, как осуществляются поворот и реверсирование пульсирующего магнитного поля в статоре принимающего двигателя (т. е. сельсина).

Будем считать для простоты, что статорные и роторные обмотки двигателей имеют всего по одному витку. Пусть статоры дающего и принимающего двигателей одинаково расположены в пространстве и соединены началами одноименных фаз (рис. 372), а сами фазы статоров соединены в звезду. Пусть также ротор принимающего двигателя удален, а на кольца ротора дающего двигателя подано переменное напряжение.

При такой схеме дающий двигатель можно рассматривать как трансформатор с первичной роторной обмоткой и со вторичными статорными обмотками, от зажимов которых H_1 , H_2 , H_3 питаются статорные обмотки принимающего двигателя.

По правилу Ленца магнитный поток $\Phi_{сд}$, создаваемый токами в статоре дающего двигателя, в любой момент времени направлен против потока $\Phi_{рд}$, создаваемого током роторной обмотки, ослабляя его (как в трансформаторе). Благодаря такому действию магнитного потока статора всегда можно определить его направление, а значит, и направление тока в статорных обмотках (по правилу буравчика), если известно

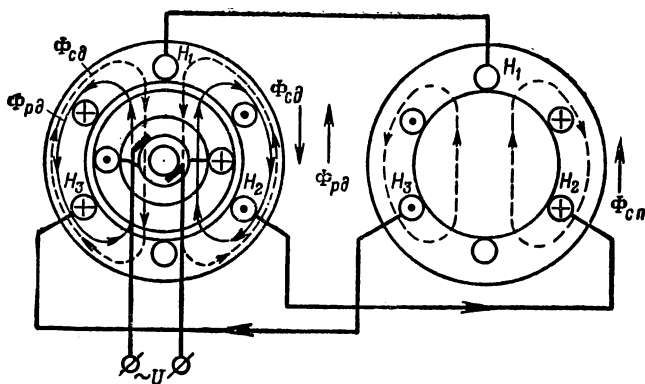


Рис. 372

направление тока в роторной обмотке (или направление создаваемого им потока).

Для некоторого момента времени, которому соответствует определенное направление мгновенного тока в роторной обмотке, токи в обмотках статора дающего двигателя направлены так, как показано на рис. 372. В первой обмотке статора при данном положении ротора электродвижущая сила не наводится (поток ротора не сцепляется с обмоткой), поэтому и ток в обмотке равен нулю.

Так как одноименные обмотки статоров соединены последовательно, то те же самые токи, проходя по обмоткам статора принимающего двигателя, создают в этом статоре магнитный поток $\Phi_{сπ}$ обратного направления по сравнению с потоком статора дающего двигателя. Оси обоих потоков параллельны друг другу в пространстве вследствие одинакового расположения статоров.

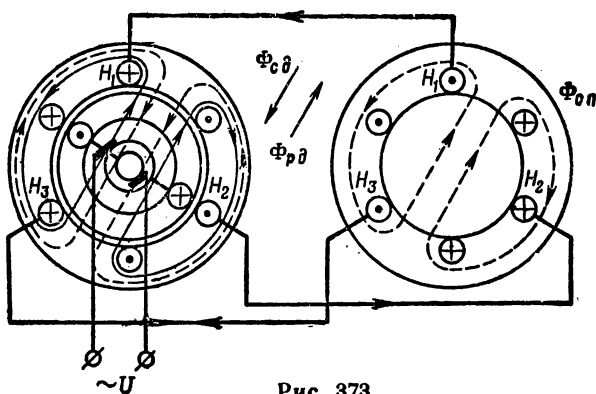


Рис. 373

Если теперь повернуть ротор дающего двигателя на некоторый угол, например на 30° (рис. 373), считая при этом, что переменный ток в роторной обмотке имеет такое же мгновенное значение, как и при начальном положении ротора, то одновременно повернется и магнитный поток ротора $\Phi_{рл}$, а следовательно, и магнитный поток статора $\Phi_{сд}$ (по правилу Ленца).

Новому положению магнитного потока статора $\Phi_{сд}$ дающего двигателя соответствуют несколько иные направления мгновенных токов в статорных обмотках обоих двигателей (появится ток в первых обмотках), как это показано на рис. 373 (по правилу буравчика). Из рисунка видно, что магнитный поток $\Phi_{сн}$, создаваемый токами в статоре принимающего двигателя, повернулся в пространстве в ту же сторону, и на тот же угол, что и потоки ротора и статора дающего двигателя.

Поворачивая ротор дающего двигателя на любой угол и определяя направления мгновенных токов в обмотках статоров (по потоку $\Phi_{сд}$), можно убедиться в том, что при каждом повороте ротора поле статора принимающего двигателя поворачивается на такой же угол.

Так можно поворачивать в пространстве относительно статора пульсирующее магнитное поле, которое создается переменными однофазными токами, проходящими по статорным обмоткам принимающего двигателя. Переменные токи в отдельных обмотках при этом или совпадают по фазе, или сдвинуты на угол в 180° , в зависимости от положения ротора дающего двигателя относительно статора этого же двигателя.

Для реверсирования поля статора в принимающем двигателе при неизменном направлении вращения ротора дающего двигателя достаточно поменять местами два любых провода, соединяющих статорные обмотки. Из рис. 374, где показано пересоединение проводов, соединяющих начала вторых и

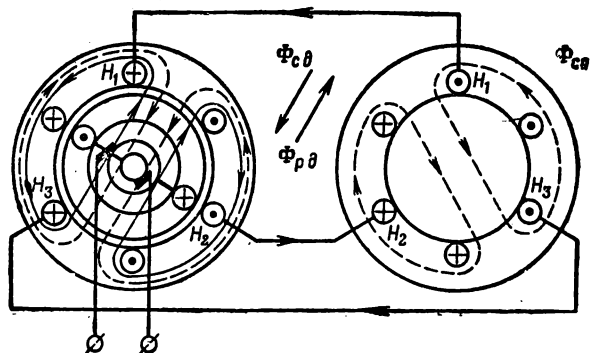


Рис. 374

третьих обмоток, видно, что при повороте ротора дающего двигателя в ту же сторону, что и в первом случае, магнитное поле статора принимающего двигателя повернулось на такой же угол, но в обратную сторону.

Теперь нетрудно понять, как работает индукционная синхронная передача. Принципиальная схема передачи изображена на рис. 375. Роторные обмотки обоих двигателей включены параллельно и питаются от одного и того же источника переменного тока. Статорные обмотки соединены в звезду, а свободные концы одноименных обмоток соединены тремя проводами.

На рис. 376 показано совершенно одинаковое расположение роторов относительно статорных обмоток. При таком положении роторов токи в статорных обмотках отсутствуют. Объясняется это тем, что роторные пульсирующие потоки $\Phi_{р д}$ и $\Phi_{р п}$ наводят в одноименных обмотках статоров одинаковые, но противоположно направленные электродвижущие силы, которые уравнивают друг друга. Стоит, однако, ротор дающего двигателя повернуть на тот или иной угол α , как равенство между электродвижущими силами нарушится и в обмотках статоров появятся токи. Эти токи создадут в статоре принимающего двигателя магнитное поле $\Phi_{с п}$, которое своей

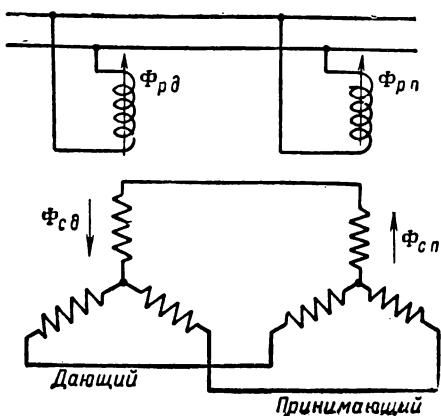


Рис. 375

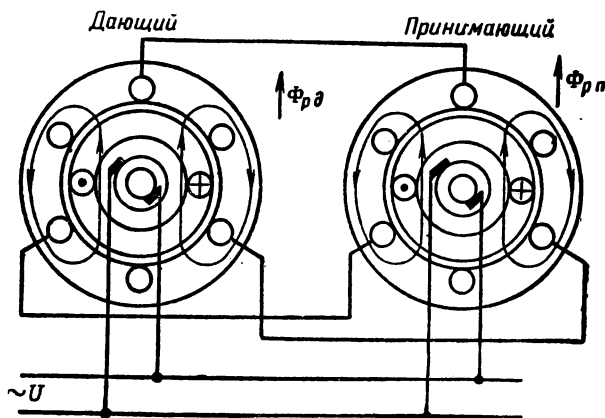


Рис. 376

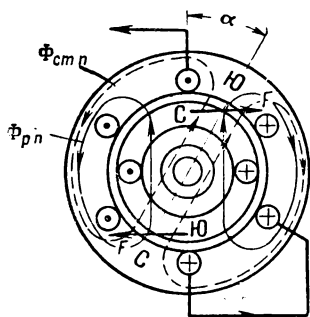


Рис. 377

осью будет повернуто относительно оси поля $\Phi_{рп}$ ротора принимающего двигателя на такой же угол, на какой повернется ротор дающего двигателя.

В результате взаимодействия разноименных полюсов полей (рис. 377) ротор принимающего начнет поворачиваться за полем статора. Поворот ротора будет продолжаться до тех пор, пока он опять не займет одинаковое положение с ротором дающего двигателя, так как только в этом случае в одноименных ста-

торных обмотках электродвижущие силы опять уравновесят друг друга и токи в обмотках прекратятся (с прекращением токов исчезает магнитное поле в статоре и его взаимодействие с ротором прекращается).

Для полного исчезновения токов в статорных обмотках ротор принимающего должен повернуться точно на такой же угол, на какой поворачивается ротор дающего. Однако такой поворот ротора возможен лишь при полном отсутствии тормозящих усилий в двигателе, чего, конечно, на практике никогда не бывает. Тормозящие усилия приводят к тому, что ротор принимающего всегда поворачивается на несколько меньший угол по сравнению с ротором дающего, вследствие чего и возникают ошибки в синхронной передаче.

Отработка углов исполнительным механизмом при индукционной синхронной передаче производится ручным приводом путем совмещения индекса с указательной стрелкой принимающего двигателя, т. е. так же, как и при электромагнитной синхронной передаче.

§ 173. ИНДУКЦИОННАЯ СИНХРОННАЯ ПЕРЕДАЧА С НУЛЬ-ИНДИКАТОРОМ

Электрическая схема индукционной передачи с нуль-индикатором изображена на рис. 378. По этой схеме, как и по схеме потенциометрической передачи, нуль-индикатором передаются не сами углы, а лишь сигналы, по которым отрабатываются углы.

Принимающий двигатель (сельсин) работает в режиме трансформатора, т. е. имеет неподвижный ротор, от обмотки которого питается чувствительный прибор, называемый нуль-индикатором. Ротор неподвижен благодаря тому, что его вал соединяется с валом исполнительного механизма, имеющего значительный тормозящий момент. Сельсин, используемый

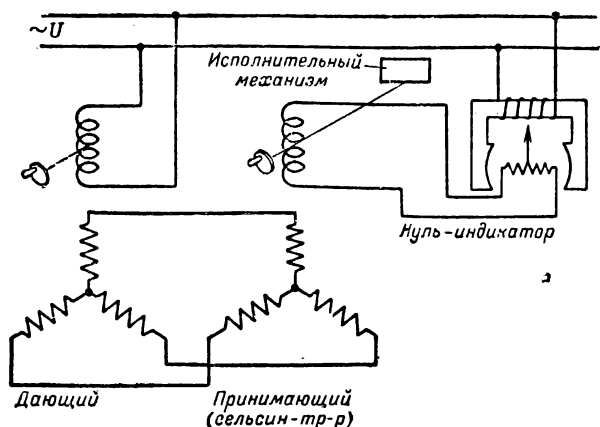


Рис. 378

в трансформаторном режиме, называется сельсин-трансформатором.

Нуль-индикатор представляет собой ферродинамический прибор, т. е. прибор электродинамической системы, в котором для усиления магнитных полей используются стальные сердечники. По устройству нуль-индикатор отличается от приборов магнитоэлектрической системы тем, что у него вместо постоянного магнита имеется подковообразный стальной сердечник с намагничивающей обмоткой (рис. 379). Для уменьшения вихревых токов сердечник и стальной цилиндр сделаны наборными.

Намагничивающая обмотка является неподвижной обмоткой прибора. Подвижная обмотка выполнена примерно так же, как и у приборов магнитоэлектрической системы. Для облегчения веса обмотка сделана без рамки, а ее витки склеены шеллаком и образуют жесткую катушку. Полуоси с токоведущими пружинками также приклеены к обмотке шеллаком. Ток в подвижную обмотку подается от роторной обмотки сельсин-трансформатора. Неподвижная обмотка питается от одного источника с ротором дающего двигателя.

Стрелка прибора имеет двустороннее отклонение, поэтому нуль находится посередине шкалы. При отсутствии тока в подвижной обмотке вращающий момент в приборе отсутствует и

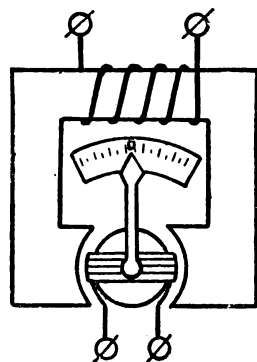


Рис. 379

указательная стрелка стоит против нуля, отчего собственно прибор и получил название нуль-индикатора.

Вращающий момент в нуль-индикаторе, как в приборе электродинамической системы, определяется формулой

$$M_{вр} = c I_n I_p,$$

где I_n и I_p — токи в неподвижной и подвижной обмотках; c — постоянный коэффициент.

Если через подвижную обмотку пропустить ток, имеющий одинаковую частоту с током неподвижной обмотки и совпадающий с ним по фазе, то в приборе возникнет вращающий момент, под действием которого подвижная обмотка вместе с указательной стрелкой повернется в ту или иную сторону в зависимости от направления вращающего момента.

Из рис. 380, а, где изображен график мгновенных значений вращающего момента при прохождении по обмоткам прибора токов, совпадающих по фазе, видно, что вращающий момент в течение всего периода имеет положительные значения, поэтому подвижная обмотка прибора должна поворачиваться в одну сторону.

Если теперь через подвижную обмотку пропустить ток, сдвинутый относительно тока неподвижной обмотки на 180° (рис. 380, б), то направления токов в обмотке изменятся на обратные, следовательно, вращающие моменты также изменят знак и стрелка прибора отклонится в другую сторону. Это свойство нуль-индикатора давать разные по знаку вращающие моменты и используется в синхронной передаче для отработки передаваемых углов. Необходимый угол сдвига фаз между токами в обмотках нуль-индикатора получается с помощью сельсин-трансформатора следующим образом.

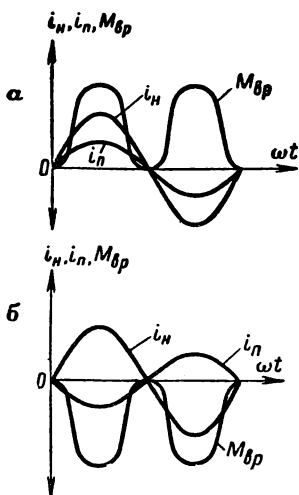


Рис. 380

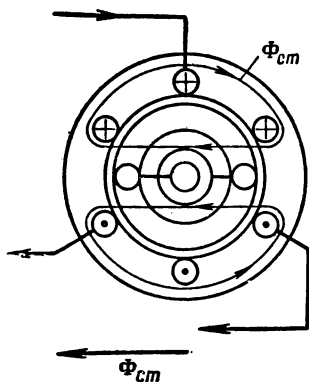


Рис. 381

При неподвижном роторе дающего двигателя магнитное поле статора в сельсин-трансформаторе также не изменяет направления своей оси в пространстве. Поэтому, если ротор сельсин-трансформатора расположить относительно статора так, как показано на рис. 381, то в его обмотке не будет возникать электродвижущая сила из-за отсутствия сцепления обмотки с магнитным потоком статора $\Phi_{ст}$. Стоит, однако, ротор дающего двигателя повернуть в какую-нибудь сторону, как поле статора в сельсин-трансформаторе повернется на такой же угол и в ту же сторону (если питающие провода соединяют одноименные обмотки статоров) и будет индуцировать в роторной обмотке переменную электродвижущую силу. Если затем ротор дающего двигателя повернуть в противоположную от начального положения сторону, то в роторной обмотке сельсин-трансформатора опять возникнет переменная электродвижущая сила, но уже сдвинутая относительно первой на 180° , так как все мгновенные значения этой электродвижущей силы изменят свои направления на противоположные.

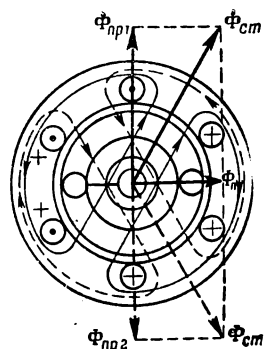


Рис. 382

В наличии угла сдвига фаз между электродвижущими силами в 180° можно убедиться, разложив в обоих случаях вектор магнитного потока поля статора $\Phi_{ст}$ на продольную $\Phi_{пр}$ и поперечную $\Phi_{п}$ составляющие (рис. 382). Электродвижущие силы в роторной обмотке наводятся продольными составляющими $\Phi_{пр1}$ и $\Phi_{пр2}$, а они, как видно из рисунка, имеют противоположные направления при разных положениях оси поля статора. Следовательно, и электродвижущие силы, наводимые этими составляющими, будут сдвинуты на 180° .

Под действием электродвижущих сил роторной обмотки сельсин-трансформатора в подвижной обмотке нуль-индикатора возникает ток, совпадающий по фазе с током неподвижной обмотки или сдвинутый относительно него на 180° . Это и вызывает отклонение указательной стрелки в ту или иную сторону. Для отработки передаваемого угла необходимо поворачивать ротор сельсин-трансформатора (маховичком) в такую сторону, чтобы угол отклонения стрелки уменьшался до тех пор, пока стрелка не встанет опять на нуль. При этом положении стрелки ротор окажется повернутым на такой же угол, как и поле статора, и таким образом сообщит исполнительному механизму передаваемый угол поворота.

Следует отметить, что синхронная передача с нуль-индикатором передает углы более точно, чем другие, благодаря высокой чувствительности нуль-индикатора.

§ 174. СИНХРОННАЯ ПЕРЕДАЧА С ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ СЕЛЬСИНОМ

Синхронная передача с дифференциальным сельсином применяется для контроля за синфазностью положений двух ведущих валов, а также в тех случаях, когда необходимо, чтобы исполнительный механизм поворачивался на угол, равный сумме или разности углов, задаваемых одновременно двумя управляющими механизмами.

Дифференциальный сельсин отличается от рассмотренных нами тем, что у него и статор, и ротор имеют трехфазную об-

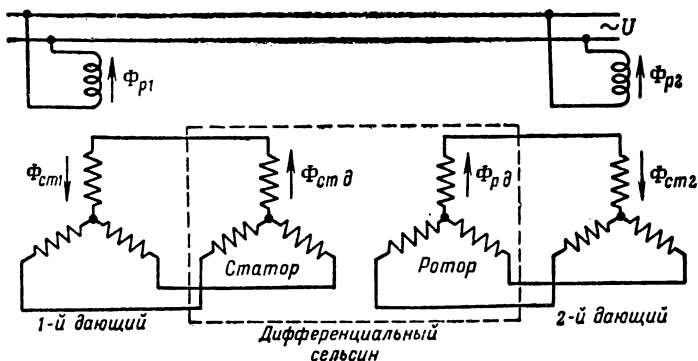


Рис. 383

мотку. Электрическая схема передачи изображена на рис. 383. В этой схеме дифференциальный сельсин — принимающий и обе его обмотки питаются от статоров двух дающих сельсинов.

Токи статорных обмоток каждого дающего сельсина создают в дифференциальном сельсине свои магнитные потоки: первый дающий двигатель создает поток $\Phi_{стд}$, а второй — поток $\Phi_{рд}$. В результате взаимодействия потоков $\Phi_{стд}$ и $\Phi_{рд}$ ротор дифференциального сельсина удерживается в пространстве в строго определенном положении (рис. 384).

Если повернуть ротор первого дающего сельсина по часовой стрелке, например, на угол α_1 , то поле статора $\Phi_{стд}$ дифференциального сельсина повернется на тот же угол и в ту же сторону, так как по схеме рис. 383 проводами соединены одноименные обмотки статоров. Вместе с полем статора повернется и ротор дифференциального сельсина благодаря взаимодействию разноименных полюсов полей. Такой поворот ротора мы уже рассматривали в сельсинах с однофазным ротором.

Что же произойдет, если теперь повернуть ротор второго дающего сельсина также по часовой стрелке на угол α_2 ? Оче-

видно, поле ротора $\Phi_{р.д}$ дифференциального сельсина повернется **относительно ротора** и поля статора на тот же угол и в ту же сторону вследствие того, что ротор дифференциального и статор второго дающего сельсинов соединены между собой одноименными обмотками. Обмотки же ротора и статора в дифференциальном сельсине по выполнению ничем не отличаются, т. е. сдвинуты своими началами и концами на угол в 120° .

Взаимодействуя с разноименными полюсами поля статора (рис. 385), поле ротора дифференциального сельсина вместе с ротором повернется в обратную сторону, т. е. против часовой стрелки на такой же угол α_2 , на какой будет повернут ротор второго дающего сельсина.

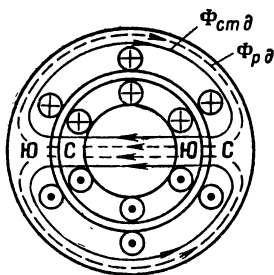


Рис. 384

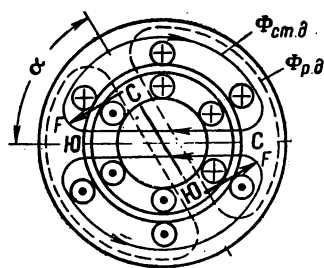


Рис. 385

Таким образом, в результате поворота роторов двух дающих сельсинов ротор дифференциального сельсина поворачивается на угол, равный разности углов поворота этих роторов:

$$\alpha = \alpha_1 - \alpha_2.$$

Достаточно поменять местами два любых провода, соединяющие одноименные обмотки одного из дающих сельсинов и дифференциального сельсина, чтобы ротор этого сельсина стал поворачиваться на угол, равный сумме углов поворота обоих сельсинов. В этом и заключается работа дифференциального сельсина.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ XVII

1. Что такое синхронная электрическая передача?
2. Из каких элементов состоит любая синхронная передача?
3. Что называется углом ошибки в синхронных передачах и чему он равен?
4. На чем основан принцип работы потенциметрической синхронной передачи?
5. Какова электрическая схема потенциметрической синхронной передачи?
6. От чего зависит угол ошибки в потенциметрической синхронной передаче?

7. Каковы элементы электромагнитной синхронной передачи и на чем основан принцип работы передачи?
 8. В чем основной недостаток электромагнитной синхронной передачи?
 9. Каковы элементы индукционной синхронной передачи и в чем заключается самосинхронизация в этой передаче?
 10. Какова электрическая схема индукционной синхронной передачи и на чем основан принцип ее работы?
 11. От чего зависит угол ошибки в индукционной синхронной передаче?
 12. Опишите электрическую схему индукционной синхронной передачи с нуль-индикатором и ее работу.
 13. В чем заключаются физические процессы в синхронной передаче с дифференциальным сельсином?
 14. Каково назначение синхронной передачи с дифференциальным сельсином?
-

ГЛАВА XVIII

СЛЕДЯЩИЙ ПРИВОД

§ 175. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СЛЕДЯЩЕМ ПРИВОДЕ

Как мы видели, при синхронной индикаторной передаче исполнительный механизм поворачивается на передаваемые углы вручную. Такая отработка углов возможна лишь в том случае, когда тормозящий момент исполнительного механизма сравнительно невелик (под силу одному человеку) и не требуется большой точности и быстроты в передаче углов поворота механизмам.

При больших тормозящих моментах со стороны исполнительных механизмов, а также при необходимости в точной и быстрой отработке угла применяется силовой электрический привод, который для увеличения точности отработки передаваемых углов дополняется следящим устройством, в результате чего получается так называемый силовой **следящий привод**.

Следящие устройства как бы выполняют функции человека: они «следят» за передаваемым углом поворота (или другими величинами) и автоматически поворачивают исполнительный механизм с помощью электрического двигателя.

В основе работы следящего привода лежит использование обратной связи, благодаря которой исполнительный механизм поворачивается именно на такой угол, который передается синхронной передачей.

Принцип обратной связи заключается в том, что вал исполнительного механизма соединяется либо непосредственно с валом принимающего устройства (т. е. с сельсин-трансформатором или потенциометром), от которого через усилитель питается приводной двигатель в момент передачи углов, либо с валом специального контактного устройства, с помощью которого вал принимающего сельсина при своем повороте на передаваемый угол включает приводной двигатель. Приведенный во вращение приводным двигателем исполнительный механизм поворачивает вал принимающего устройства (в направлении заданного угла) или вал контактного устройства (в сторону выключения приводного двигателя), благодаря

чему приводной двигатель, отработав нужный угол, автоматически останавливается.

По принципу работы следящие приводы делятся на приводы прерывного управления и приводы непрерывного управления, или синхронно-следящие приводы.

Следящий привод прерывного управления обрабатывает передаваемые углы периодически, вследствие чего валы дающего устройства и исполнительного механизма синфазны лишь в состоянии покоя. Синхронно-следящий привод осуществляет практически синфазное вращение валов дающего устройства и исполнительного механизма.

Следящие приводы выполняются на разную мощность приводного электрического двигателя. Привод мощностью до 200 *вт* называют просто следящим приводом, мощностью от 500 *вт* и выше — силовым следящим приводом.

§ 176. СЛЕДЯЩИЙ ПРИВОД ПРЕРЫВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Одна из возможных схем следящего привода прерывного действия изображена на рис. 386.

В этой схеме роль контактного устройства выполняют два металлических полукольца *A* и *B*, разделенных изоляцией и укрепленных изолированно на диске. Вал диска связан механически с валом исполнительного механизма и имеет два контактных изолированных кольца *C* и *D*, электрически соединенных с полукольцами *A* и *B*.

Ток к кольцам подводится через две щетки, соединенные с одинаковыми обмотками возбуждения, расположенными на главных полюсах приводного серийного двигателя *Д*. Для замыкания цепи при пуске двигателя служит изолированно укрепленный на валу принимающего сельсина рычаг *P* со скользящим контактом; к втулке рычага прижимается щетка, подводящая ток.

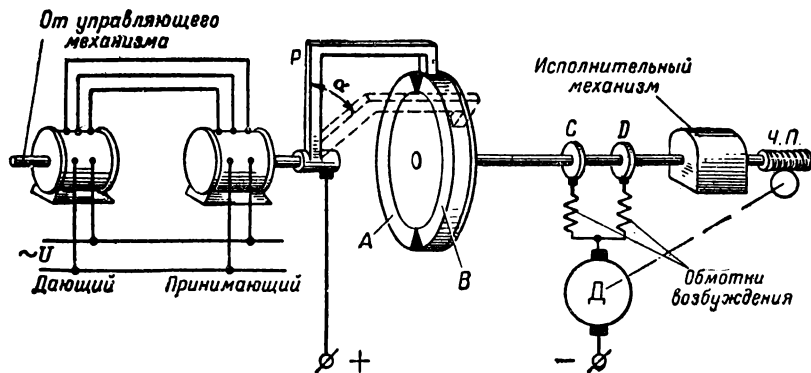


Рис. 386

Работа привода заключается в следующем.

При передаче угла от управляющего механизма ротор принимающего сельсина поворачивается в соответствующую сторону и рычагом замыкает цепь приводного (серийного) двигателя через одно из полуколец (на схеме через полукольцо *В*), контактное кольцо, обмотку возбуждения и якорь. Двигатель начинает вращаться и с помощью червячной передачи *Ч. П.* поворачивает вал исполнительного механизма. Механизм в свою очередь поворачивает диск с контактными полукольцами в ту же сторону, в какую поворачивается рычаг принимающего двигателя (на схеме по часовой стрелке). Как только будет отработан заданный угол, скользящий контакт рычага станет на изоляцию между полукольцами, цепь двигателя прервется и он остановится.

При повороте ротора принимающего сельсина в другую сторону включается другая обмотка возбуждения, которая соединяется в схеме навстречу первой (т. е. создает магнитный поток обратного направления), поэтому двигатель начинает вращаться также в другую сторону, обрабатывая передаваемый угол.

На точность передачи углов влияет толщина изоляционного слоя между полукольцами. Чем этот слой тоньше, тем меньше получается ошибка, однако слишком тонкий слой делать нельзя, так как в этом случае не будет размыкаться цепь двигателя. Существуют и другие типы контактных устройств, которые обеспечивают сравнительно небольшой угол ошибки.

Основной недостаток следящего привода прерывного управления заключается в том, что при нем скорость вращения приводного двигателя не зависит от передаваемого угла и остается неизменной (определяется напряжением источника, питающего приводной двигатель, и тормозящим моментом исполнительного механизма), вследствие этого синфазного вращения валов дающего сельсина и исполнительного механизма добиться невозможно (углы обрабатываются с запаздыванием).

В рассматриваемом приводе в следящее устройство входят рычаг ротора принимающего сельсина, диск с полукольцами и контактные кольца; для обратной связи используется вал диска контактных полуколец.

§ 177. СИНХРОННО-СЛЕДЯЩИЙ ПРИВОД

Принцип работы синхронно-следающего привода заключается в том, что для вращения приводного двигателя используется либо разность потенциалов (при потенциометрической передаче), либо электродвижущая сила в роторной обмотке сельсин-трансформатора (при индукционной передаче), возникающие при передаче углов исполнительным механизмом.

Как электродвижущая сила, так и разность потенциалов предварительно усиливаются ламповым или электромашинным усилителем.

Благодаря тому, что разность потенциалов при потенциометрической передаче и электродвижущая сила в роторной обмотке сельсин-трансформатора при индукционной передаче пропорциональны передаваемому углу (для индукционной

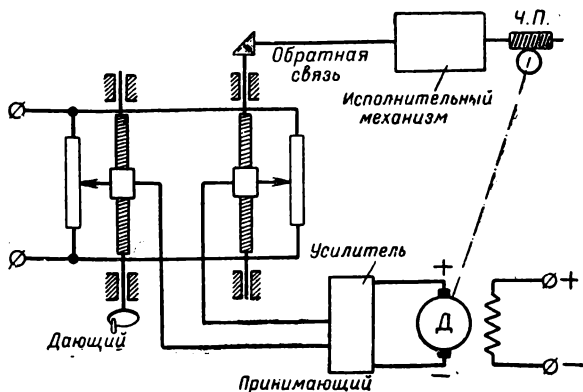


Рис. 387

передачи это правильно при сравнительно небольших углах), то и скорость вращения приводного двигателя также пропорциональна передаваемому углу. Поэтому валы дающего сельсина и исполнительного механизма вращаются почти синфазно (поворот валов практически происходит одновременно).

На рис. 387 приводится электрическая схема синхронно-следящего привода с потенциометрической передачей. В этой схеме винт ползунка принимающего потенциометра связан с валом исполнительного механизма (коническими шестернями) и образует обратную связь. Якорь приводного двигателя питается от усилителя (условно показан в виде прямоугольника), а шунтовая обмотка возбуждения двигателя — от постороннего источника постоянного тока.

Работа привода заключается в следующем.

При передвижении ползунка дающего потенциометра между ползунками возникает разность потенциалов, которая подается в ламповый усилитель и отсюда на щетки якоря приводного двигателя. В зависимости от знака разности потенциалов двигатель начинает вращаться в ту или иную сторону. При этом исполнительный механизм, а следовательно, и винт ползунка принимающего потенциометра также поворачиваются. Как только ползунок займет одинаковое положение с ползунком дающего потенциометра, разность потенциалов

станет равной нулю, напряжение на зажимах якоря двигателя исчезнет и он остановится.

На рис. 388 приведена другая схема синхронно-следящего привода. В этой схеме используется индукционная синхронная передача. Обратная связь осуществлена путем соединения вала ротора принимающего сельсин-трансформатора с валом исполнительного механизма.

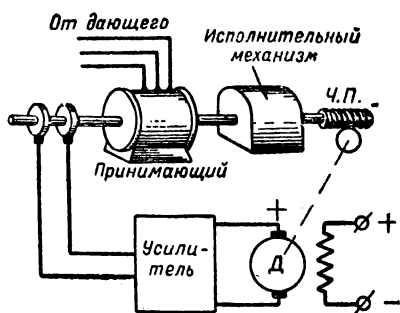


Рис. 388

Эта схема отличается от предыдущей только тем, что при передаче углов напряжение в усилитель подается с роторной обмотки сельсин-трансформатора, а исполнительный механизм при своем вращении приводным двигателем поворачивает вал ротора принимающего двигателя на заданный угол. В результате электродвижущая сила в роторной обмотке исчезает и приводной двигатель останавливается.

Схема синхронно-следящего привода с электромашинным усилителем приводится на рис. 389. В данной схеме напряжение, возникающее на кольцах роторной обмотки принимающего сельсин-трансформатора, усиливается следующим образом.

Два триода по однополупериодной схеме выпрямления переменного тока питают две одинаковые управляющие об-

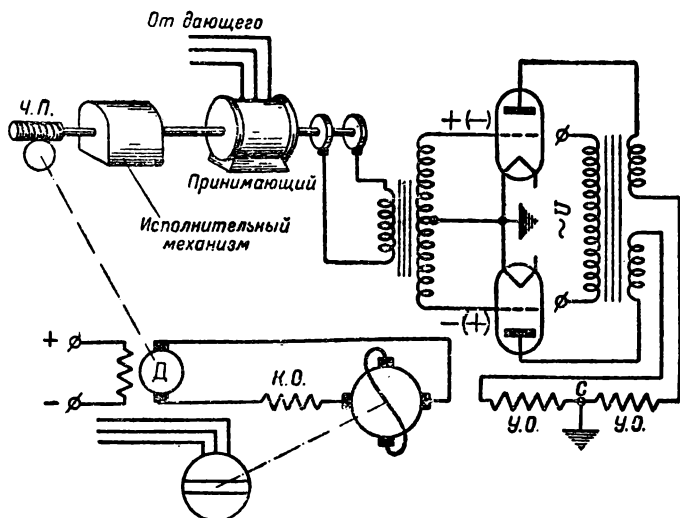


Рис. 389

мотки У. О. электромашинного усилителя, включенные навстречу. Триод — это электронная лампа, отличающаяся от кенотрона лишь наличием управляющей сетки, расположенной между анодом и катодом. С помощью сетки можно управлять величиной анодного тока в течение проводящей части периода, для чего достаточно изменять лишь величину или знак потенциала на сетке (положительные потенциалы ускоряют движение электронов, а следовательно, и увеличивают анодный ток, отрицательные потенциалы приводят к обратным результатам).

Напряжение на сетки триодов по схеме, изображенной на рис. 389, подается со вторичной обмотки трансформатора, первичная обмотка которого питается напряжением роторной обмотки сельсин-трансформатора, т. е. напряжением, подводимым к лампам (триодам) для усиления. Вторичная обмотка трансформатора средней точкой соединена с катодами ламп, поэтому на сетки подается только половина вторичного напряжения. Цепь накала катодов не показана для упрощения схемы. Катоды с общей точкой С управляющих обмоток электромашинного усилителя показаны соединенными через массу (чтобы не затемнять схемы). При отсутствии напряжения на сетках ламп (когда не передаются углы) эти лампы работают, как обычные кенотроны, и питают одинаковыми выпрямленными токами управляющие обмотки электромашинного усилителя.

Из-за встречного соединения обмоток результирующий магнитный поток, создаваемый ими, равен нулю, поэтому электромашинный усилитель не возбуждается и напряжение на его зажимах равно нулю. С началом передачи углов в роторной обмотке сельсин-трансформатора возникает электродвижущая сила, благодаря чему на сетки ламп подаются напряжения, имеющие разные знаки, поскольку сетки присоединены к разным зажимам вторичной обмотки трансформатора.

Так как лампы пропускают ток только в течение проводящей части периода, когда на аноды подаются положительные потенциалы, то сетка, на которую в это время будет подан положительный потенциал, усилит ток в лампе, а сетка с отрицательным потенциалом — уменьшит. Вследствие нарушения равенства между токами в электромашинном усилителе возникнет результирующий магнитный поток под действием управляющих обмоток, поэтому на зажимах усилителя появится напряжение и приводной двигатель придет во вращение.

В дальнейшем все будет происходить так, как и в предыдущих схемах, т. е. двигатель станет поворачивать исполнительный механизм, а вместе с ним и ротор принимающего сельсина, пока не будет отработан передаваемый угол. При изменении знака передаваемого угла электродвижущая сила в роторной обмотке сельсин-трансформатора изменит свои

мгновенные значения на противоположные (§ 170). Это приведет к тому, что положительные потенциалы в течение проводящей части периода будут подаваться на сетку другой лампы, благодаря чему в конечном итоге изменится полярность на зажимах электромашинного усилителя, а значит, и направление вращения приводного двигателя.

Синхронно-следающий привод с электромашинным усилителем применяется обычно в качестве силового следающего привода.

§ 178. КОЛЕБАНИЯ В СЛЕДЯЩЕМ ПРИВОДЕ

Рассматривая схемы следающего привода, мы считали, что после отработки передаваемого угла приводной двигатель, а следовательно, и исполнительный механизм останавливаются. В действительности же, если не принять специальных мер, двигатель не остановится, а по инерции будет вращаться еще некоторое время. В результате этого исполнительный механизм повернет ротор принимающего сельсина на несколько больший угол, чем необходимо, и в роторной обмотке опять появится электродвижущая сила, но сдвинутая относительно предыдущей на 180° .

Под действием электродвижущей силы усилитель вызовет вращение двигателя в обратную сторону; вращаясь в этом направлении, он опять провернет ротор через синфазное положение и т. д. Короче говоря, все вращающиеся части в системе, обслуживаемой приводом, будут испытывать колебания. Частота этих колебаний зависит от суммарного момента инерции системы, от коэффициента усиления усилительного устройства и от величины сил трения, возникающих в системе. С увеличением момента инерции и сил трения частота колебаний уменьшается, высокий же коэффициент усиления, наоборот, повышает частоту колебаний.

Для устранения колебаний применяют разные способы демпфирования, т. е. успокоения вращающихся частей системы. Демпфирование достигается либо механическим путем — своевременным (автоматическим) торможением приводного двигателя при его остановке, либо электрическим — воздействием на скорость вращения двигателя с помощью напряжения, подаваемого через усилитель.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ XVIII

1. Что такое силовой следающий привод?
 2. На чем основана работа следающего привода?
 3. Чем отличается следающий привод прерывного управления от синхронно-следающего привода?
 4. В чем состоит работа следающего привода прерывного управления?
 5. В чем заключается принцип работы синхронно-следающего привода?
 6. Чем вызываются колебания в системах со следающим приводом и каковы меры устранения колебаний?
-

ГЛАВА XIX

МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

§ 179. ПРОСТЕЙШИЙ (ДРОССЕЛЬНЫЙ) МАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Магнитным усилителем называется устройство, которое позволяет значительно повышать действующее значение переменного тока (I_n) в приемнике при помощи очень небольшого по величине постоянного тока I_n .

По своему назначению магнитный усилитель аналогичен электромашинному усилителю и на практике используется

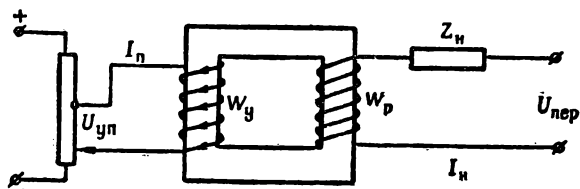


Рис. 390

обычно при автоматическом управлении приемником переменного тока (например, двигателем путем изменения потребляемой им мощности).

Принцип действия магнитного усилителя и физические процессы, которые в нем происходят, удобнее всего рассмотреть на простейшем дроссельном усилителе. Такой усилитель состоит из набороного железного сердечника и двух обмоток — рабочей (W_p) и управляющей (W_y).

Схема включения усилителя при его работе изображена на рис. 390. Как видно из схемы, переменное напряжение $U_{пер}$ от питающего источника подводится к рабочей обмотке и приемнику переменного тока (Z_n), соединенным последовательно. На управляющую обмотку в нужные моменты времени подается от управляющего устройства (например, от потенциометра со средней точкой) напряжение U_{yn} определенной величины и полярности.

При отсутствии напряжения на управляющей обмотке магнитный усилитель в данной схеме действует, как обычный дроссель без воздушного зазора в сердечнике с очень большим индуктивным сопротивлением $X_{Lp} = \omega L$ (см. § 71). Вследствие этого в цепи рабочей обмотки, а следовательно, и в приемнике переменного тока устанавливается незначительный по действующему значению ток

$$I_n = \frac{U_{\text{пер}}}{\sqrt{(R_p + R_n)^2 + (X_{Lp} + X_{Ln})^2}}, \quad (167)$$

где R_p и R_n — активные сопротивления рабочей обмотки и приемника переменного тока;

X_{Lp} и X_{Ln} — индуктивные сопротивления рабочей обмотки приемника.

Если теперь постепенно увеличивать напряжение на управляющей обмотке от нуля до номинального значения, то в обмотке появится постоянный ток, который также будет увеличиваться в соответствии с законом Ома:

$$I_n = \frac{U_{yn}}{R_n},$$

где R_n — сопротивление обмотки.

Одновременно с увеличением постоянного тока начнет увеличиваться действующее значение переменного тока в рабочей обмотке усилителя и в приемнике Z_n , причем сначала незначительно, а затем очень быстро, пропорционально увеличению постоянного тока. С некоторого значения переменный ток перестанет увеличиваться, несмотря на дальнейшее увеличение постоянного тока в управляющей обмотке.

Конечно, с уменьшением постоянного тока до нуля переменный ток также уменьшается до своей начальной величины.

При изменении полярности и постепенном повышении напряжения на управляющей обмотке переменный ток в рабочей обмотке усилителя изменяется по тому же закону, что и в первом случае.

Зависимость между токами в обмотках усилителя графически изображена на рис. 391.

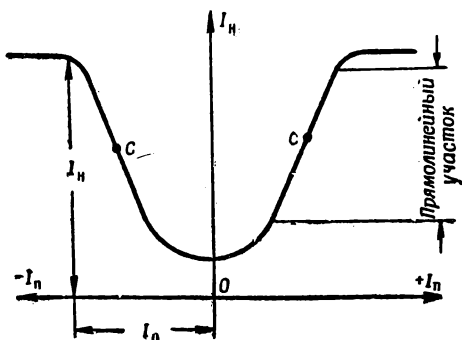


Рис. 391

Отношение наибольшего действующего значения переменного тока в рабочей обмотке к соответствующей величине постоянного тока в управляющей обмотке (см. рис. 391) называется коэффициентом усиления по току (K_i) магнитного усилителя:

$$K_i = \frac{I_n}{I_n}. \quad (168)$$

Характер изменения переменного тока в рабочей обмотке усилителя объясняется **непостоянством** среднего значения относительной магнитной проницаемости $\mu_{ж}$ стального сердечника для переменного магнитного потока рабочей обмотки. Это подтверждается формулой (167).

Действительно, при неизменной величине действующего значения напряжения $U_{пер}$ источника, а также постоянстве сопротивлений R_p , R_n и X_{Ln} ток I_n в цепи может увеличиваться только за счет уменьшения индуктивного сопротивления рабочей обмотки $X_{Lp} = \omega L_p$. Это уменьшение возможно лишь при уменьшении среднего значения относительной магнитной проницаемости сердечника $\mu_{ж}$, так как величина коэффициента самоиндукции обмотки L_p определяется равенством

$$L_p = k \frac{4\pi W_p^2 S \mu_{ж}}{l} 10^{-7} \text{ генри.}$$

Зависимость среднего значения относительной магнитной проницаемости сердечника от величины тока в управляющей обмотке графически изображена на рис. 392. Данные для построения кривой получаются опытным путем. Для этого, пользуясь формулой (167), определяют индуктивное сопротивление рабочей обмотки $X_{Lp} = \omega L_p$, а следовательно,

и ее коэффициент самоиндукции $L_p = \frac{X_{Lp}}{\omega}$ для каждого значения тока в управляющей обмотке. Зная же коэффициент

самоиндукции и исходя из равенства $L_p = k \frac{4\pi W_p^2 S \mu_{ж}}{l} 10^{-7}$,

определяют среднее значение относительной магнитной проницаемости сердечника.

Физические процессы, которые происходят в магнитном усилителе при его работе, заключаются в следующем.

При наибольшем действующем значении тока в рабочей обмотке (см. рис. 391) сердечник усилителя находится в со-

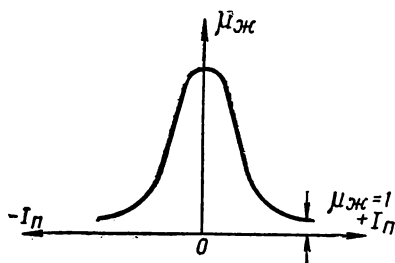


Рис. 392

стоянии магнитного насыщения, которое поддерживается магнитным полем, создаваемым током управляющей обмотки.

Такое состояние сердечника означает, что все электронные орбиты его атомов удерживаются в ориентированном положении.

Таким образом, на долю переменного магнитного поля в сердечнике не остается электронных орбит для ориентировки, и это равносильно тому, что поле создается током I_n в воздухе, относительная магнитная проницаемость которого постоянна по величине и равна единице.

Благодаря такому значению относительной магнитной проницаемости сердечника индуктивное сопротивление рабочей обмотки становится наименьшим, а ток в обмотке достигает своего предельного действующего значения.

Если теперь немного уменьшить ток в управляющей обмотке, то среднее значение относительной магнитной проницаемости сердечника соответственно возрастет (см. рис. 392). Физически это означает, что с уменьшением тока в управляющей обмотке часть электронных орбит выходит из ориентированного положения под действием магнитного поля переменного тока и используется им для своего усиления.

Увеличение среднего значения относительной магнитной проницаемости сердечника приводит к увеличению индуктивного сопротивления рабочей обмотки, а следовательно, и к уменьшению тока I_n в ней.

При дальнейшем уменьшении тока в управляющей обмотке все больше освобождается электронных орбит для использования их переменным магнитным полем, поэтому среднее значение относительной магнитной проницаемости сердечника продолжает увеличиваться, а ток в рабочей обмотке уменьшаться.

Когда ток в управляющей обмотке доходит до нуля, все электронные орбиты атомов сердечника используются магнитным полем переменного тока, поэтому среднее значение относительной магнитной проницаемости достигает наибольшей величины, а ток в рабочей обмотке, наоборот, становится наименьшим.

При увеличении тока в управляющей обмотке от нуля физические процессы в усилителе протекают в обратном порядке.

Чем большей крутизной обладает кривая $\mu_{ж}$, тем меньше получается величина, на которую необходимо изменить ток в управляющей обмотке, чтобы вызвать значительное изменение среднего значения относительной магнитной проницаемости сердечника.

Это обстоятельство и позволяет производить **большие** изменения тока I_n в рабочей обмотке усилителя путем **очень**

небольшого по величине изменения постоянного тока в управляющей обмотке.

Следует заметить, что при наличии тока в управляющей обмотке сердечник не перемагничивается, а лишь несколько размагничивается (в большей или меньшей степени в зависимости от величины этого тока) и опять намагничивается в первоначальном направлении.

При изменении направления тока в управляющей обмотке направление намагничивания сердечника изменяется на противоположное, физические же процессы в усилителе ничем не отличаются от рассмотренных.

Итак, можно сделать вывод, что **принцип действия магнитного усилителя основан на изменении среднего значения относительной магнитной проницаемости стального сердечника под действием магнитного поля, создаваемого током управляющей обмотки.**

Усилительное свойство магнитного усилителя оценивают также и коэффициентом усиления по мощности (K_p), определяемого равенством

$$K_p = \frac{I_n^2 R_n}{I_n^2 R_n} = \frac{R_n}{R_n} K_i^2, \quad (169)$$

где $I_n^2 R_n$ и $I_n^2 R_n$ — соответственно мощности, потребляемые приемником переменного тока и управляющей обмоткой;

$K_i = \frac{I_n}{I_n}$ — коэффициент усиления по току.

Рассмотренный нами усилитель обладает тремя существенными недостатками. Во-первых, в таком усилителе искажается электрический сигнал U_{yn} , подаваемый на управляющую обмотку. Во-вторых, исключается возможность изменения фазы переменного тока в приемнике на противоположную в случае изменения полярности сигнала. В-третьих, по приемнику проходит переменный ток (правда, незначительный) и при отсутствии тока в управляющей обмотке, т. е. при отсутствии сигнала.

Все эти недостатки недопустимы при автоматическом управлении приемником переменного тока, например асинхронным двухфазным двигателем, поэтому усилитель почти не применяется на практике.

Искажение электрического сигнала объясняется тем, что в управляющей обмотке возникает электродвижущая сила взаимной индукции под действием магнитного поля рабочей обмотки. Для устранения электродвижущей силы изменяют форму сердечника магнитного усилителя (рис. 393), управляющую обмотку помещают на средний стержень, а рабочую обмотку выполняют из двух секций, расположенных на край-

них стержнях. Секции обмотки соединяют между собой согласно, т. е. так, чтобы создаваемые ими магнитные потоки $\Phi_{\text{пер}}$ складывались и замыкались, минуя средний стержень сердечника.

Что же касается изменения фазы переменного тока на противоположную, то здесь необходимо заметить следующее.

Изменить фазу переменного тока в приемнике на противоположную — это значит изменить в нем направление всех мгновенных значений тока на противоположное. Таким образом, фаза и противофаза сдвинуты на угол в 180° .

Проще всего изменить фазу на противоположную можно путем переключения проводов, питающих приемник переменным током. Однако применять такой способ в магнитном усилителе нецелесообразно, так как он требует дополнительных приборов (специального переключателя, реле), а главное снижает надежность управления приемником.

Гораздо проще и надежнее изменение фазы осуществляется при помощи рассматриваемого ниже дифференциального магнитного усилителя. Этот усилитель устраняет и последний недостаток простейшего усилителя, т. е. обесточивает приемник при отсутствии напряжения на управляющей обмотке.

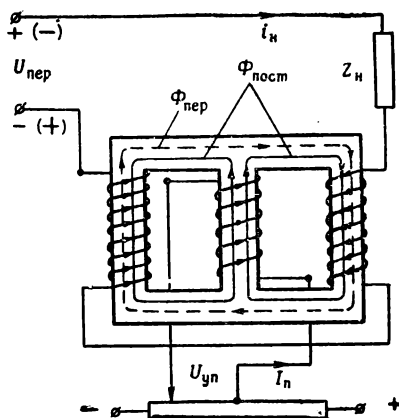


Рис. 393

§ 180. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Дифференциальный магнитный усилитель состоит из двух одинаковых усилителей, причем на среднем стержне сердечника каждого усилителя имеется еще одна обмотка (W_n), называемая обмоткой начального подмагничивания.

Электрическая схема усилителя изображена на рис. 394. В этой схеме одноименные обмотки обоих усилителей соединены между собой последовательно и к ним подводится напряжение от трех различных источников тока, а именно: к рабочей обмотке — от вторичной обмотки трансформатора, к обмотке начального подмагничивания — от источника постоянного тока, поддерживающего неизменное напряжение U_n на зажимах, и, наконец, к управляющей обмотке — от источника управляющего устройства.

Обмотки начального подмагничивания обоих усилителей соединяются согласно, т. е. создают в сердечниках усилителей магнитные поля одинакового направления. Управляющие обмотки, наоборот, соединяются несогласно, поэтому создают в сердечниках поля разного направления.

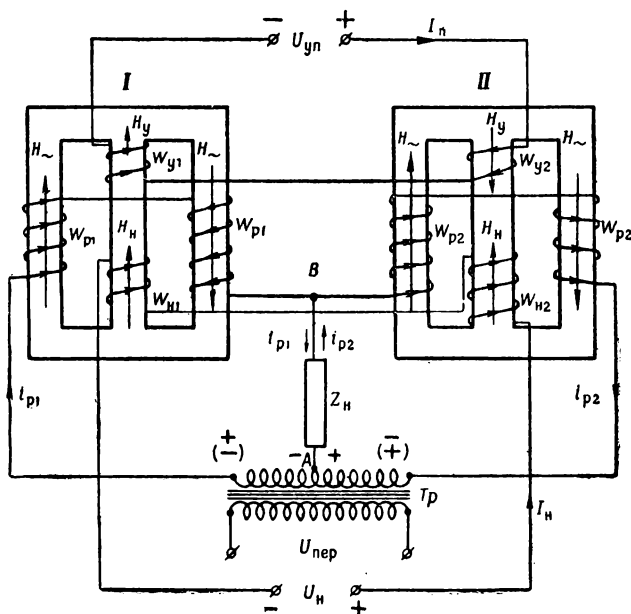


Рис. 394

Приемник переменного тока (Z_n) подключен к средней точке A вторичной обмотки трансформатора и к общей точке B рабочих обмоток усилителей. При таком включении приемника его одновременно питают через рабочие обмотки обе секции вторичной обмотки трансформатора. Вследствие этого мгновенные токи i_{p1} и i_{p2} , посылаемые этими секциями, имеют в приемнике противоположное направление, т. е. находятся в противоположных фазах (рис. 394).

Противоположное направление мгновенных токов физически означает, что через приемник проходит мгновенный ток i_n , равный разности этих токов:

$$i_n = i_{p1} - i_{p2}. \quad (170)$$

Работа дифференциального магнитного усилителя сводится к следующему. При отсутствии управляющего напряжения U_{yn} , т. е. напряжения на управляющей обмотке, действующие значения токов I_{p1} и I_{p2} в рабочих обмотках уси-

лителей равны между собой, так как сопротивления в цепях обмоток и напряжения, под которыми они находятся, одинаковы: на каждую обмотку и приемник подается половина напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Ток, проходящий по обмоткам начального подмагничивания, уменьшает магнитную проницаемость сердечников. Поэтому несколько уменьшаются индуктивные сопротивления обмоток, отчего соответственно увеличиваются токи в обмотках. Равенство между токами сохраняется, так как уменьшение индуктивных сопротивлений обмоток происходит в равной степени.

Вследствие равенства токов в рабочих обмотках тока в приемнике, как это следует из формулы (170), нет, т. е.

$$I_n = I_{p1} - I_{p2} = 0.$$

В этом случае мгновенные токи i_{p1} и i_{p2} обмоток замыкаются по контуру, образуемому этими обмотками и обмоткой трансформатора, минуя приемник (разность потенциалов между точками *A* и *B*, к которым подключен приемник, равна нулю).

Так с помощью дифференциального усилителя достигается отсутствие тока в приемнике, когда на управляющую обмотку не подается напряжение (электрический сигнал).

Пусть теперь на усилитель подано управляющее напряжение такой полярности, какая указана на рис. 394 (плюс — справа).

Тогда вследствие несогласного соединения управляющих обмоток магнитное поле, создаваемое обмоткой начального подмагничивания, в первом усилителе (I) под действием поля управляющей обмотки станет сильнее, а во втором (II), наоборот, — слабее. В результате этого магнитная проницаемость сердечника первого усилителя уменьшится, а магнитная проницаемость сердечника второго усилителя увеличится.

Изменение магнитной проницаемости сердечников приведет к соответствующему изменению индуктивных сопротивлений рабочих обмоток, т. е. к уменьшению X_{Lp1} и к увеличению X_{Lp2} . В рабочей обмотке первого усилителя ток увеличится, а в рабочей обмотке второго усилителя — уменьшится. В приемнике появится ток $I_n = I_{p1} - I_{p2}$ такой же фазы, как и ток рабочей обмотки первого усилителя, так как $I_{p1} > I_{p2}$.

При изменении полярности управляющего напряжения соотношение между токами в рабочих обмотках усилителей изменится, т. е. ток I_{p2} станет больше тока I_{p1} . Через приемник пойдет ток $I_n = I_{p1} - I_{p2}$ уже противоположной фазы, так как токи I_{p1} и I_{p2} находятся в противоположных фазах.

Величина тока в обмотках начального подмагничивания должна быть такой, чтобы при отсутствии управляющего напряжения значению токов в рабочих обмотках соответство-

вала точка C , лежащая в середине прямолинейного участка кривой, изображенной на рис. 391. При таком условии величина тока I_n в приемнике при одинаковых (по абсолютной величине) относительных значениях управляющего напряжения будет также одинакова.

Существенный недостаток дифференциального магнитного усилителя — сравнительно большие потери в нем на холостом ходу, т. е. при отсутствии управляющего напряжения.

Из-за наличия обмоток начального подмагничивания по рабочим обмоткам усилителя проходят сравнительно большие токи, которые непрерывно расходуют энергию на нагрев обмоток ($P_p = I_p^2 R_p$).

Небольшая мощность расходуется и в обмотках начального подмагничивания.

§ 181. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ K У МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Коэффициент усиления по току — основная характеристика магнитного усилителя. Чем выше этот коэффициент, тем проще и экономичнее получаются элементы цепи управления, тем большей мощностью переменного тока можно управлять при одинаковых потерях на управление усилителем.

Повышение коэффициента усиления по току на практике достигается следующими мерами:

- увеличением крутизны кривой намагничивания у ферромагнитных материалов, применяемых для изготовления сердечников усилителей;

- повышением частоты переменного тока;

- применением положительной обратной связи в схеме усилителя;

- применением многокаскадного усилителя.

Рассмотрим, каким образом повышается коэффициент усиления по току в каждом отдельном случае.

Повышение коэффициента усиления за счет увеличения крутизны кривой намагничивания сердечника объясняется так.

Чем круче кривая намагничивания (рис. 395, a , кривая I), тем меньше ток $I_{\text{пл}}$ в управляющей обмотке в момент магнитного насыщения сердечника, тем, следовательно, выше коэффициент уси-

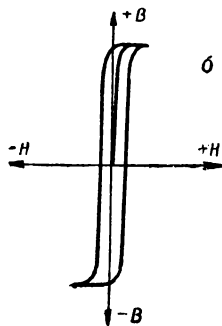
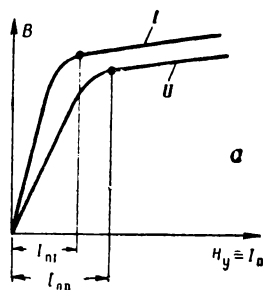


Рис. 395

ления при одинаковой величине наибольшего значения тока I_n в приемнике. У обычной трансформаторной стали кривая намагничивания имеет сравнительно небольшую крутизну, поэтому такая сталь не может дать высокого коэффициента усиления.

Для сердечников усилителей чаще всего применяются специальные сплавы типа пермаллоя, супермаллоя (79% Ni; 16% Fe; 5% Mo) и т. п., для которых характерны очень узкие практически прямоугольной формы петли гистерезиса (рис. 395, б). Подобного типа сплавы одновременно с повышением коэффициента усиления уменьшают и потери на гистерезис в сердечнике.

При высоких частотах переменного тока (до 10^5 гц) сердечники усилителей выполняются из ферритов.

Повышение крутизны кривой намагничивания сердечников — наиболее рациональный способ увеличения коэффициента усиления по току у магнитных усилителей.

В отношении повышения частоты переменного тока следует сказать, что этот способ менее эффективен, хотя одновременно с увеличением коэффициента усиления дает возможность уменьшать геометрические размеры сердечника и, кроме того, несколько уменьшает постоянную времени обмоток ($\tau = \frac{L}{R}$).

Последнее обстоятельство очень важно при использовании усилителей для автоматического управления двигателями в устройствах, требующих быстрого выполнения тех или иных операций исполнительными механизмами.

Увеличение коэффициента усиления с повышением частоты можно объяснить так.

Из формулы $X_{L_p} = \omega L_p = 2\pi f L_p$ следует, что при условии неизменной величины индуктивного сопротивления рабочей обмотки усилителя (в противном случае изменится действующее значение тока в этой же обмотке и в приемнике) с увеличением частоты переменного тока можно соответственно уменьшать коэффициент самоиндукции обмотки

$$L_p = k \frac{4\pi W_p^2 S \mu_{ж}}{l} \cdot 10^{-7}.$$

Для уменьшения коэффициента самоиндукции, как это видно из последнего равенства, необходимо уменьшать число витков W_p рабочей обмотки усилителя. Однако с уменьшением числа витков уменьшится и магнитный поток Φ , создаваемый рабочей обмоткой, так как поток всегда пропорционален числу ампервитков обмотки, т. е. произведению $I_p W_p$ (см. § 40 и 49).

Уменьшение переменного магнитного потока рабочей обмотки позволяет соответственно уменьшить и поток, создаваем-

мый управляющей обмоткой, так как этот поток используется для ослабления переменного магнитного потока.

Уменьшение магнитного потока управляющей обмотки осуществляется уменьшением ампервитков $I_n W_y$ этой обмотки, причем обычно уменьшают и величину тока I_n , и число витков W_y обмотки так, чтобы произведение $I_n W_y$ уменьшилось на требуемую величину. Этим одновременно достигают увеличения коэффициента усиления по току и уменьшения постоянной времени обмотки:

$$\tau = \frac{L_n}{R_n}, \quad L_n \equiv W_n^2.$$

Уменьшение обоих потоков в сердечнике позволяет, кроме того, уменьшить и размеры сердечника.

Положительная обратная связь, к которой прибегают для повышения коэффициента усиления, заключается в том, что обмотку начального подмагничивания питают не от постороннего источника постоянного тока, а выпрямленным током рабочей обмотки усилителя. При таком питании обмотки ее называют обмоткой обратной связи (W_{oc}).

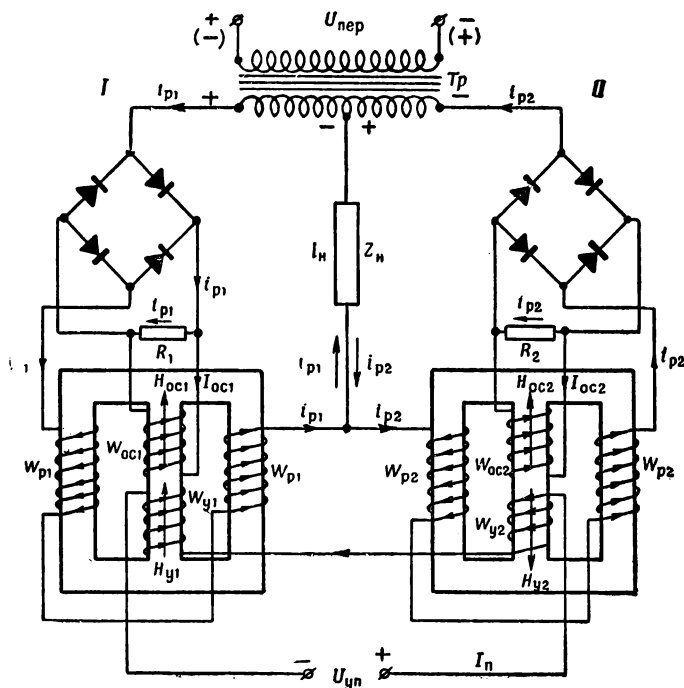


Рис. 396

Схема дифференциального магнитного усилителя с положительной обратной связью изображена на рис. 396.

Чтобы в обмотках обратной связи получить токи нужной величины, эти обмотки шунтируют сопротивлениями R_1 и R_2 , величина которых подбирается.

Работа усилителя с положительной обратной связью немногим отличается от работы обычного дифференциального усилителя.

При отсутствии управляющего напряжения токи в рабочих обмотках, а следовательно, и в обмотках обратной связи равны, поэтому тока в приемнике нет.

С появлением управляющего напряжения (см. полярность напряжения на рис. 396) ток в рабочей обмотке первого усилителя увеличивается, а в рабочей обмотке второго усилителя уменьшается (как в дифференциальном усилителе) вследствие изменения магнитных полей, создаваемых в каждом усилителе обмотками связи. Поля изменяются под действием полей управляющих обмоток.

При изменении токов в рабочих обмотках соответственно изменяются токи и в обмотках обратной связи. В обмотке W_{oc1} ток увеличивается, а в обмотке W_{oc2} — уменьшается. В обмотках начального подмагничивания дифференциального усилителя такого изменения не происходило.

Вследствие указанного изменения токов в обмотках обратной связи дополнительно изменяются их поля, а именно, в первом усилителе поле обмотки становится еще сильнее, а во втором — еще слабее. От изменения полей дополнительно изменяются и токи в рабочих обмотках: ток I_{p1} увеличивается, а ток I_{p2} уменьшается. Ток в приемнике $I_n = I_{p1} - I_{p2}$ также дополнительно увеличивается, а это повышает коэффициент усиления.

Изменение токов в рабочих обмотках прекращается, когда в сердечнике первого усилителя наступает магнитное насыщение, а в сердечнике второго усилителя магнитное поле обмотки обратной связи полностью компенсируется полем управляющей обмотки.

При изменении полярности управляющего напряжения соотношение между токами рабочих обмоток изменяется, а ток в приемнике изменяет фазу на противоположную (как в дифференциальном усилителе).

Для еще большего увеличения коэффициента усиления по току применяются многокаскадные усилители. В этих усилителях выпрямленное напряжение первого каскада, т. е. дифференциального усилителя с положительной обратной связью, подается на управляющую обмотку второго каскада. Выпрямленное напряжение этого каскада подается на управ-

ляющую обмотку следующего каскада и т. д. От последнего каскада питается приемник переменного тока.

Теоретически при помощи многокаскадного усилителя можно получить любой коэффициент усиления по току.

Однако с увеличением числа каскадов увеличивается и общая продолжительность переходных (неустановившихся) режимов или, как говорят иначе, возрастает инерционность магнитного усилителя. Продолжительность неустановившегося режима в каждой обмотке определяется ее постоянной времени $\tau = \frac{L}{R}$. При большом количестве обмоток общая продолжительность неустановившихся режимов всех обмоток становится значительной.

Большая инерционность многокаскадных усилителей ограничивает область их применения.

По сравнению с электромашинными, электронными и другими усилителями магнитные усилители обладают следующими преимуществами:

- простотой устройства и отсутствием вращающихся частей;
- постоянной готовностью к действию;
- долговечностью (срок службы практически не ограничивается);
- слабой чувствительностью к ударам и сотрясениям;
- возможностью получения высоких коэффициентов усиления по току (до 10^4 — 10^6).

Благодаря этим преимуществам магнитные усилители находят широкое применение на практике.

Существенный недостаток магнитных усилителей — большая инерционность. Общая продолжительность неустановившихся режимов может достигать нескольких десятых долей секунды. Этот недостаток ставит магнитные усилители в невыгодное положение перед другими усилителями и в ряде случаев ограничивает возможность их применения.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ К ГЛАВЕ XIX

1. Объясните назначение, устройство и принцип действия простейшего магнитного усилителя.
 2. Что называется коэффициентом усиления по току у магнитного усилителя?
 3. В чем заключаются недостатки простейшего магнитного усилителя?
 4. Каковы достоинства и недостатки дифференциального магнитного усилителя?
 5. Для чего служит обмотка начального подмагничивания в дифференциальном магнитном усилителе?
 6. Каковы способы повышения коэффициента усиления по току у магнитных усилителей?
 7. Для чего служит обмотка обратной связи у магнитного усилителя?
-

ПРИЛОЖЕНИЕ

АБСОЛЮТНАЯ ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА МКСА

Наименование и определение единиц системы МКСА

Наименование	Сокращенное обозначение		Определение
	русским алфавитом	латинским (греческим) алфавитом	

I. Основные единицы

Единица длины: метр	<i>м</i>	m	Единица длины, определяемая платино-иридиевой мерой, носящей знак 28 и являющейся государственным эталоном длины в СССР
Единица массы: килограмм	<i>кг</i>	kg	Единица массы, определяемая платино-иридиевой мерой, носящей знак 12 и являющейся государственным эталоном массы в СССР
Единица времени: секунда	сек. или с	sec или s	Единица времени (среднего солнечного), равная 0,0000116057628 средних звездных суток (средние звездные сутки — это промежуток времени между двумя последовательными верхними кульминациями средней точки весеннего равноденствия)
Единица электрического тока: ампер	<i>а</i>	A	Неизменяющийся электрический ток, который, протекая по каждому из двух бесконечно длинных параллельных прямолинейных проводников ничтожно малого кругового сечения, рас-

Наименование	Сокращенное обозначение		Определение
	русским алфавитом	латинским (греческим) алфавитом	
			положенных на расстоянии 2 метров один от другого в безвоздушном пространстве, создает между этими проводниками на каждый метр их длины силу взаимодействия, которая массе в одну десятиmillionную (0,0000001) килограмма сообщает ускорение в 1 метр на секунду в квадрате

II. Электрические и магнитные единицы

Единица количества электричества: кулон или ампер-секунда	<i>к</i> <i>а-с</i>	<i>С</i> <i>A-S</i>	Количество электричества, протекающего через поперечное сечение проводника в течение 1 секунды при неизменяющемся токе в 1 ампер
Единица разности электрических потенциалов, электрического напряжения и электродвижущей силы: вольт	<i>в</i>	<i>V</i>	Разность электрических потенциалов между двумя точками линейного проводника, по которому протекает неизменяющийся электрический ток в 1 ампер, когда мощность, потребляемая проводником между этими точками, равна 1 ватту
Единица электрического сопротивления: ом	<i>ом</i>	<i>Ω</i>	Электрическое сопротивление между двумя точками линейного проводника, в котором неизменяющаяся разность электрических потенциалов в 1 вольт между этими точками производит электрический ток в 1 ампер
Единица электрической емкости: фарада	<i>ф</i>	<i>F</i>	Электрическая емкость конденсатора, между обкладками которого существует разность электрических потенциалов в 1 вольт, когда конденсатор заряжен количеством электричества в 1 кулон

Наименование	Сокращенное обозначение		Определение
	русским алфавитом	латинским (греческим) алфавитом	
Единица магнитного потока: вольт-секунда	<i>в-сек</i>	V-s	Магнитный поток, при убывании которого до нуля количество электричества, протекающее сквозь поперечное сечение неразветвленной линейной электрической цепи, сцепленной с этим потоком и имеющей сопротивление в 1 ом, равно 1 кулону
Единица магнитной индукции: вольт-секунда на квадратный метр	<i>в-сек/м²</i>	V-s/m ²	Магнитная индукция, при которой магнитный поток через поверхность в 1 квадратный метр, расположенную в равномерном магнитном поле перпендикулярно к линиям магнитной индукции, равен 1 вольт-секунде
Единица индуктивности и взаимной индуктивности: генри	<i>гн</i>	H	Индуктивность электрической цепи, с которой сцепляется магнитный поток самоиндукции в 1 вольт-секунду при неизменяющемся электрическом токе в цепи, равном 1 амперу. Взаимная индуктивность двух электрических цепей, с одной из которых сцепляется магнитный поток взаимной индукции в 1 вольт-секунду при неизменяющемся токе в другой цепи, равном 1 амперу
Единица напряженности магнитного поля (магнитной силы): ампер на метр	<i>а/м</i>	A/m	Напряженность магнитного поля в однородной и изотропной среде на расстоянии 2 метров от бесконечно длинного прямолинейного проводника ничтожно малого кругового сечения, по которому протекает ток в 1 ампер

Соотношения между абсолютными и международными единицами измерения электрических и магнитных величин

Между абсолютными МКСА и международными единицами существуют следующие соотношения:

- 1 международный джоуль = 1,00020 абсолютного джоуля;
- 1 международный ватт = 1,00020 абсолютного ватта;
- 1 международный ампер = 0,99985 абсолютного ампера;
- 1 международный кулон = 0,99985 абсолютного кулона;
- 1 международный вольт = 1,00035 абсолютного вольты;
- 1 международный ом = 1,00050 абсолютного ома;
- 1 международная фарада = 0,99950 абсолютной фарады;
- 1 международный вебер = 1,00035 абсолютной вольт-секунды;
- 1 международный генри = 1,00050 абсолютного генри.

Примечания: 1. Международный ампер — величина неизменяющегося электрического тока, который отлагает на катоде 0,001118 грамма серебра в секунду, проходя через водный раствор азотнокислого серебра.

2. Международный ом — сопротивление (при неизменяющемся электрическом токе и при температуре тающего льда) ртутного столба длиной 106,30 сантиметра, имеющего сечение, одинаковое по всей длине, и массу 14,4521 грамма.

Кратные и дольные единицы

Наименование кратных и дольных единиц образуется путем прибавления соответствующих приставок к наименованиям единиц измерения величин. В нижеследующей таблице приведены наименования этих приставок.

Наименование	Отношение к главной единице	Сокращенное обозначение	
		русским алфавитом	латинским (греческим) алфавитом
Пико	10^{-12}	<i>п</i>	<i>p</i>
Нано	10^{-9}	<i>н</i>	<i>n</i>
Микро	10^{-6}	<i>мк</i>	<i>μ</i>
Милли	10^{-3}	<i>м</i>	<i>m</i>
Санتي	10^{-2}	<i>с</i>	<i>c</i>
Деци	10^{-1}	<i>д</i>	<i>d</i>
Дека	10	<i>да</i>	<i>da</i>
Гекто	10^2	<i>г</i>	<i>h</i>
Кило	10^3	<i>к</i>	<i>k</i>
Мега	10^6	<i>М</i>	<i>M</i>
Гига	10^9	<i>Г</i>	<i>G</i>
Тера	10^{12}	<i>Т</i>	<i>T</i>

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
Глава I. Краткие сведения о строении вещества	8
Глава II. Электризация тел и их электрическое поле	11
§ 1. Свободные электроны	—
§ 2. Электрическая нейтральность и электризация тел	12
§ 3. Электрическое поле заряженных тел	13
§ 4. Энергия электрического поля. Электрическая энергия	16
§ 5. Метод подсчета электрической энергии	17
§ 6. Напряженность и потенциал электрического поля	18
§ 7. Вычисление потенциалов	20
§ 8. Зависимость между потенциалом и электрическими зарядами наэлектризованных тел	21
§ 9. Формулы для вычисления электрической энергии	—
§ 10. Эквипотенциальные поверхности	25
§ 11. Электрическая емкость тел	—
§ 12. Конденсатор	26
Глава III. Постоянный электрический ток	31
§ 13. Электрический ток в твердых проводниках	—
§ 14. Непроводники электрического тока	33
§ 15. Величина тока и количество электричества	35
§ 16. Сопротивление и проводимость твердых проводников	36
§ 17. Электродвижущая сила и напряжение источника электрической энергии. Потенциал в точках цепи	37
§ 18. Закон Ома для простой электрической цепи	39
§ 19. Зависимость сопротивления твердых проводников от их геометрических размеров и температуры	41
§ 20. Краткие сведения об элементах электрических цепей	44
§ 21. Условное направление тока и распределение потенциалов в цепи. Относительные потенциалы	46
§ 22. Первое и второе правила Кирхгофа	48
§ 23. Исследование режимов работы источника тока	52
§ 24. Способы соединения приемников электрической энергии между собой	58
§ 25. Измерение сопротивлений	65
§ 26. Энергия, работа и мощность электрического тока	68
§ 27. Тепловое действие тока и закон Джоуля — Ленца	72
§ 28. Использование сопротивлений в электрических цепях	76
§ 29. Физические процессы при заряде и разряде конденсатора	81
§ 30. Устройство конденсаторов	86
§ 31. Соединение конденсаторов между собой	88

	Стр.
Глава IV. Электромагнитные явления	92
А. Электромагнетизм	—
§ 32. Магнитное поле тока	—
§ 33. Графическое изображение магнитных полей	93
§ 34. Магнитные поля прямого тока, кругового тока и соленоида	94
§ 35. Природа поля постоянных магнитов	96
§ 36. Свойства сил магнитного поля	98
§ 37. Напряженность магнитного поля тока	103
§ 38. Магнитная индукция и магнитная проницаемость	105
§ 39. Ферромагнитные тела и их свойства	108
§ 40. Явления гистерезиса	111
§ 41. Магнитные материалы, применяемые в электрических приборах и машинах	114
§ 42. Магнитная цепь и магнитный поток	116
§ 43. Электромагниты и их техническое применение	118
§ 44. Действие магнитного поля на проводник с током	123
§ 45. Абсолютная практическая электромагнитная система единиц МКСА	125
Б. Электромагнитная индукция	126
§ 46. Закон электромагнитной индукции	—
§ 47. Величина индуцированной электродвижущей силы	129
§ 48. Электродвижущая сила индукции	132
§ 49. Электродвижущая сила самоиндукции	134
§ 50. Физический смысл электродвижущей силы самоиндукции	137
§ 51. Физические процессы, происходящие при включении и выключении электрических цепей, обладающих индуктивностью	139
§ 52. Электродвижущая сила взаимной индукции	143
§ 53. Вихревые токи	146
§ 54. Индукционная катушка	149
Глава V. Переменный ток	156
§ 55. Применение переменного тока в современной технике	—
§ 56. Определение переменного тока. Мгновенные значения электрических величин и их свойства	157
§ 57. Период и частота переменного тока	159
§ 58. Получение переменного синусоидального тока	160
§ 59. Электрические градусы и угловая частота	164
§ 60. Определение частоты тока в генераторах и ее связь с угловой частотой	167
§ 61. Действующие, или эффективные, значения переменных величин	168
§ 62. Фазы переменной величины и фазовый угол. Величины, совпадающие и сдвинутые по фазе	169
§ 63. Векторные диаграммы	173
§ 64. Сопротивления переменному току	178
§ 65. Цепь переменного тока с активным сопротивлением	182
§ 66. Цепь переменного тока с индуктивным сопротивлением	185
§ 67. Цепь переменного тока с емкостным сопротивлением	190
§ 68. Метод исследования сложных цепей переменного тока	194
§ 69. Цепь переменного тока с реальной катушкой	196
§ 70. Цепь переменного тока из нескольких последовательно соединенных катушек	201
§ 71. Прохождение переменного тока через катушку с железным сердечником	203

	Стр.
§ 72. Цепь из последовательно соединенных активного и емкостного сопротивлений	209
§ 73. Эквивалентная индуктивность при параллельном соединении катушек	212
§ 74. Свободные электрические колебания	215
§ 75. Цепь из параллельно соединенных катушки и конденсатора. Резонанс токов	219
§ 76. Цепь из последовательно соединенных катушки и конденсатора. Резонанс напряжений	224
§ 77. Несинусоидальные и пульсирующие токи. Закон независимости токов	229
Глава VI. Трехфазный ток	235
§ 78. Определение и получение трехфазного тока	—
§ 79. Способы соединения фаз генераторов и приемников трехфазного тока	238
§ 80. Линейные и фазовые значения токов и напряжений и соотношения между ними	244
§ 81. Мощность трехфазного тока и ее измерение	246
§ 82. Вращающееся магнитное поле трехфазного тока	248
§ 83. Вращающиеся магнитные поля двухфазного и однофазного токов	256
Глава VII. Электрические измерительные приборы	262
§ 84. Общие сведения о приборах	—
Классификация приборов по принципу действия и по роду измеряемой величины	263
Классификация приборов по степени точности	264
Общие детали устройства приборов	—
Условные знаки на шкале приборов	—
Требования, предъявляемые к приборам	266
§ 85. Приборы магнитоэлектрической системы	267
Устройство и принцип действия приборов	—
Работа магнитоэлектрического прибора	269
Свойства магнитоэлектрических приборов	271
Шунты и добавочные сопротивления к приборам	—
§ 86. Приборы электромагнитной системы	275
Устройство и принцип действия приборов	—
Работа приборов	276
Свойства приборов	277
Расширение пределов измерения у приборов	—
§ 87. Приборы электродинамической системы	278
Устройство и принцип действия приборов	—
Работа приборов	279
Соединение катушек приборов	280
Свойства приборов	284
§ 88. Приборы тепловой системы	285
Устройство и принцип действия	—
Свойства приборов	—
§ 89. Термоэлектрические приборы	286
§ 90. Частотомеры	287
§ 91. Приборы для измерения сопротивлений	288
Магнитоэлектрический омметр типа М-57	289
Мегомметр	290
§ 92. Многопредельные и комбинированные приборы	291
§ 93. Правила эксплуатации и неисправности электрических измерительных приборов	293

	Стр.
Глава VIII. Генераторы постоянного тока	296
§ 94. Принцип действия генераторов. Назначение и работа коллектора	—
§ 95. Устройство современных генераторов постоянного тока	301
§ 96. Выполнение якорных обмоток	305
§ 97. Электродвижущая сила генератора постоянного тока	308
§ 98. Реакция якоря и тормозящий момент в генераторах постоянного тока	310
§ 99. Возбуждение генераторов постоянного тока	316
§ 100. Генератор с независимым возбуждением	318
§ 101. Генератор с параллельным возбуждением	322
§ 102. Генератор со смешанным возбуждением	324
§ 103. Магнитоэлектрические генераторы	327
§ 104. Электромашинный усилитель	328
§ 105. Потери в электрических машинах	334
§ 106. Нагрев электрических машин и нормы нагрева	337
§ 107. Уход за генераторами постоянного тока	339
§ 108. Неисправности генераторов постоянного тока и их причины	341
Глава IX. Двигатели постоянного тока	343
§ 109. Обратимость электрических машин и принцип работы двигателя постоянного тока	—
§ 110. Явления, происходящие в двигателе	344
Реакция якоря	—
Вращающий момент двигателя	—
Противоэлектродвижущая сила двигателя	345
Потребляемая и полезная мощности	347
§ 111. Регулировка числа оборотов двигателей	348
§ 112. Пуск двигателей и их реверсирование	350
§ 113. Двигатель с параллельным возбуждением	352
§ 114. Двигатель с последовательным возбуждением	356
§ 115. Торможение двигателей	358
§ 116. Двигатель с независимым возбуждением	359
Глава X. Трансформаторы	362
§ 117. Назначение и устройство трансформатора малой мощности	—
§ 118. Режим холостого хода трансформатора	364
§ 119. Режим нагрузки трансформатора	367
§ 120. Потери в трансформаторе	370
§ 121. Трехфазный трансформатор	371
§ 122. Автотрансформаторы	372
Глава XI. Асинхронные двигатели	375
§ 123. Устройство и принцип работы двигателей	—
§ 124. Скольжение в асинхронных двигателях	377
§ 125. Физические процессы в асинхронном двигателе	378
§ 126. Вращающий момент асинхронного двигателя	382
§ 127. Регулировка числа оборотов и реверсирование асинхронных двигателей	386
§ 128. Свойства и применение асинхронных двигателей	387
§ 129. Включение асинхронного двигателя в сеть трехфазного тока	388
§ 130. Индукционный регулятор трехфазного тока	390
Глава XII. Генератор трехфазного тока	395
§ 131. Принцип действия и устройство генератора	—
§ 132. Электродвижущая сила генератора	398

	Стр.
§ 133. Реакция статора	398
§ 134. Внешние характеристики генератора	400
§ 135. Генератор с самовозбуждением при помощи твердых выпрямителей	402
§ 136. Мощность и коэффициент полезного действия генераторов. Уход за генераторами	404
Глава XIII. Синхронные двигатели трехфазного тока	406
§ 137. Обратимость синхронных генераторов и принцип работы синхронного двигателя	—
§ 138. Пуск синхронного двигателя	407
§ 139. Вращающий момент и свойства синхронного двигателя	408
§ 140. Реактивные синхронные двигатели	410
Глава XIV. Преобразователи	411
§ 141. Устройство и принцип работы одноякорного преобразователя	—
§ 142. Соотношение между напряжениями и токами в преобразователе	413
§ 143. Разновидности одноякорных преобразователей	416
Глава XV. Химические источники тока	417
А. Краткие сведения о химическом действии тока	—
§ 144. Проводники второго рода и их свойства	—
§ 145. Электролиз воды и поляризация электродов	419
Б. Гальванические марганцево-цинковые элементы	421
§ 146. Краткие сведения из теории гальванических элементов	—
§ 147. Устройство марганцево-цинковых элементов и физические процессы в них	425
Устройство	—
Физические процессы	428
§ 148. Электрические данные и свойства элементов	429
Электрические данные	—
Свойства элементов	431
Маркировка элементов и батарей	—
§ 149. Эксплуатация и хранение элементов	433
Заряд водоналивных элементов	—
Хранение элементов	—
Эксплуатация элементов	434
§ 150. Способы соединения гальванических элементов	—
В. Свинцовые стартерные аккумуляторы	437
§ 151. Принцип действия аккумуляторов и физические процессы в них	—
§ 152. Устройство стартерных аккумуляторных батарей	440
§ 153. Электролит, его приготовление и заливка в аккумуляторы	442
§ 154. Электрические данные и свойства свинцовых аккумуляторов	444
Электрические данные	—
Свойства аккумуляторов	446
§ 155. Правила эксплуатации стартерных аккумуляторных батарей	448
Заряд батарей	—
Разряд батарей	451

	Стр.
Уход за батареями	451
§ 156. Хранение аккумуляторных батарей	452
Г. Кадмиево-никелевые аккумуляторы	453
§ 157. Физические процессы в аккумуляторах	—
§ 158. Устройство щелочных аккумуляторов и батарей	455
§ 159. Электролит щелочных аккумуляторов, его приготовление и заливка в аккумуляторы	458
§ 160. Электрические данные и свойства щелочных аккумуляторов	460
Электрические данные	—
Свойства аккумуляторов	461
§ 161. Правила эксплуатации щелочных аккумуляторов	462
Заряд аккумуляторов	—
Разряд аккумуляторов	464
Уход за работающими аккумуляторами	465
§ 162. Хранение щелочных аккумуляторов и неисправности в них	—
Хранение аккумуляторов	—
Неисправности аккумуляторов	466
Глава XVI. Выпрямители	469
§ 163. Назначение и типы выпрямителей	—
§ 164. Полупроводники и их свойства	—
§ 165. Зависимость проводимости полупроводников от примесей	473
§ 166. Односторонняя проводимость приграничного слоя двух полупроводников	474
§ 167. Твердые выпрямители	477
§ 168. Кенотроны	482
Глава XVII. Синхронные индикаторные передачи	489
§ 169. Общие сведения о синхронных электрических передачах	—
§ 170. Потенциометрическая синхронная передача	490
§ 171. Электромагнитная синхронная передача	492
§ 172. Индукционная синхронная передача	494
§ 173. Индукционная синхронная передача с нуль-индикатором	500
§ 174. Синхронная передача с дифференциальным сельсином	504
Глава XVIII. Следящий привод	507
§ 175. Общие сведения о следящем приводе	—
§ 176. Следящий привод прерывного управления	508
§ 177. Синхронно-следящий привод	509
§ 178. Колебания в следящем приводе	513
Глава XIX. Магнитные усилители	514
§ 179. Простейший (дроссельный) магнитный усилитель	—
§ 180. Дифференциальный магнитный усилитель	519
§ 181. Способы повышения коэффициента усиления K у магнитных усилителей	522
Приложение. Абсолютная практическая электромагнитная система МКСА	527

Цена 8 р. 85 к.